

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年06月06日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760388

研究課題名（和文）砂礫・石礫河川を対象とした平面2次元河床・流路変動解析モデルの開発

研究課題名（英文）DEVELOPMENT OF TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL FOR VARIATION OF BED AND CHANNEL IN GRAVEL AND STONY RIVER

研究代表者

重枝 未玲 (SHIGE-EDA MIREI)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70380730

研究成果の概要（和文）：

有限体積法と近似リーマン解法を用い、掃流砂と河床表層下の粒度比率が交換層の粒度比率に及ぼす影響を考慮した平面2次元混合砂礫河床変動モデルと非静水圧分布と鉛直方向流速を考慮した準3次元自由表面流モデルを新たに構築した。実験結果に基づく検証から、同モデルが常・射流の遷移区間においても安定した計算が可能で、河床高や粒度分布、河床変動を予測する上で重要な底面付近の流速などの実験結果を十分な精度で予測可能であること、などを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Numerical model for gravel transport and quasi-3D numerical model for flood flows were developed. The model for gravel transport links grain size distributions in the bed load, surface layer and subsurface with the gravel transfer function. The quasi-3D model uses the vertically averaged and moment equations as governing equations to allow for the incorporation of pre-assumed linear distribution of horizontal velocity and quadratic vertical velocity and pressure distributions. These models are also based on finite volume method with approximate Riemann solver. Through the verification against experimental data, these models have ability to reproduce the process of bed degradation and aggradation with armouring and downstream fining as well as the complex behavior of the flows in curved channel and in river confluence.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：砂礫河川，石礫河川，河床変動，流路変動，平面2次元モデル，交換層，粒度分布，数値解法

1. 研究開始当初の背景

近年、治水と環境とが調和した川づくりが求められている。河川的环境保全を目的に

様々な河川で自然再生事業が取り組まれており、このような河川の再自然化のための考え方や適用例の取りまとめ(Klingeman,

P.C.: 自然再生の河川工学, 2003)も行われている。

河川の再自然化のためには、各河川が有する自立形成機能を把握し、その特性に応じて河道管理や環境保全対策を行う必要がある。河道形成流量と河床材料の代表粒径と安定な河道断面形状の川幅、水深・河床勾配との関係は、その評価方法の一つであり実務での検討に用いられつつある。このような経験式に加え、評価に有用な様々な数値モデルが開発されている。代表的なモデルには、移動一般座標系を用いて流路の形状を追跡する平面2次元解析モデルや、斜面崩落モデルを導入し河床と河岸の侵食を一連のプロセスとして取り扱う平面2次元解析モデル、石礫河川を対象とした平面2次元河床変動モデル、などがある。各河川が有する自立形成機能を把握するためには、出水や河川改修によって生じる、(1) 混合粒径砂河床の河床変動・分級作用、(2) 砂州の形成、(3) 浮州などのドライ状態となる河床、(4) 河岸侵食、(5) 石や礫による流水抵抗、(6) 粒径の大きな河床材料による遮蔽効果・それに伴う流砂量の変化を適切に取り扱うことができ、出水規模や履歴、河床材料に応じた安定河床・河道の形成などの非常に複雑な一連のプロセスを的確に評価できることが求められるが、上記の(1)~(6)の全てを満たすモデルは著者らの知る限り存在しない。

2. 研究の目的

本研究は、以上のような背景を踏まえ、混合粒径河床での河床と流路変動を予測でき、かつ巨石あるいは石などによる流路変動の制御が検討可能な平面2次元河床・流路変動モデルの構築を目的としている。このために、著者らが開発した既存の平面2次元河床変動モデルをベースに、上記の(1)~(6)の要素を満たすモデルを構築する。ここでは、(1) 混合粒径砂の分級作用、(5) 石や礫による流水抵抗、(6) 粒径の大きな河床材料による遮蔽効果・それに伴う流砂量の変化を主としてモデルの構築を行う。

3. 研究の方法

(1) 数値モデルの構築

当初、既存の平面2次元河床変動モデルに混合砂礫河床変動モデルを組み込むことで、平面2次元混合河床変動モデルを構築する予定であった。しかし、混合粒径の河床変動の解析を行う際に、流れが常流から射流に遷移する区間で粒度分布の連続の式で数値的不安定が生じ、計算の実行が困難であった。そ

こで、数値解析手法を再検討し、有限体積法と近似リーマン解法の一つである HLLC (Harten-Lax-van Leer and Contact)法を用い、新たな平面2次元混合砂礫河床変動モデルの構築に取り組んだ。同時に、河床変動を予測する上で底面付近の流速を予測することが重要であることから、平面2次元モデルの枠組みで水深方向の流速分布を予測可能な準3次元自由表面流モデルの開発にも取り組んだ。

(2) モデルの検証

平面2次元混合砂礫河床変動モデルの検証は次のように行った。平面2次元混合砂礫河床変動モデルについては、①河床低下による *armouring*、②常射流混在下での河床材料の細粒化を伴う河床上昇の実験結果に適用し、流れが常流から射流に遷移する区間で、同モデルが粒度分布の連続の式で数値的不安定が生じることもなく安定した計算が可能かどうかを確認するとともに、河床高や粒度分布などの実験結果に基づき、その予測精度を検証した。

準3次元自由表面流モデルについては、湾曲部での流れとともに、後述する「モデルの検証のための実験データ」に基づき、その予測精度を検証した。

(3) モデルの検証のための実験データと現地データの収集

平面2次元混合砂礫河床変動モデルと準3次元自由表面流モデルの検証のために、以下の実験データおよび現地データの収集・整理を行った。

- ①同規模河川が合流する河川での流れと河床変動に関する実験データの収集と整理
- ②日本および海外の実河川データに基づき、安定した河道の川幅、水深、河床勾配および代表粒径のデータの収集と整理

4. 研究成果

(1) 平面2次元混合砂礫河床変動モデルの開発と予測精度の検証

同モデルは、基礎方程式には①2次元浅水方程式と②全粒径と交換層の概念に基づく粒径別の流砂の連続の式、流砂量式には①遮蔽効果に修正エギアザロフ式を適用した芦田・道上の流砂量式と②礫間に存在する砂の影響を考慮した Wilcock and Crowe の流砂量式、交換層と貯留層との境界での粒度比率には①平野の式と②Hoey and Ferguson の式を用い、河床表層下の堆積層の粒度分布を更新しつつ、混合粒径河床変動を予測する上で重要となる交換層の粒度比率について、河床上昇時には

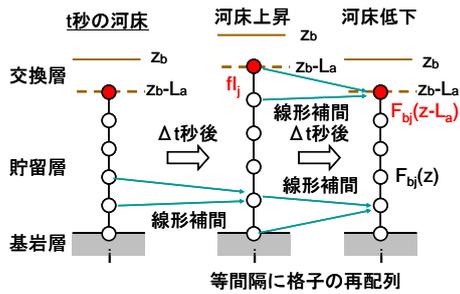
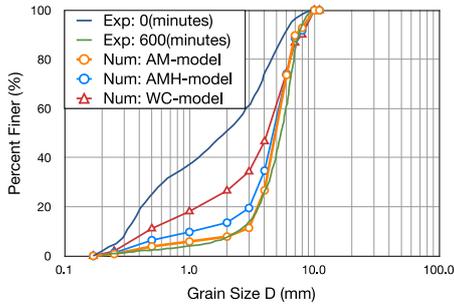
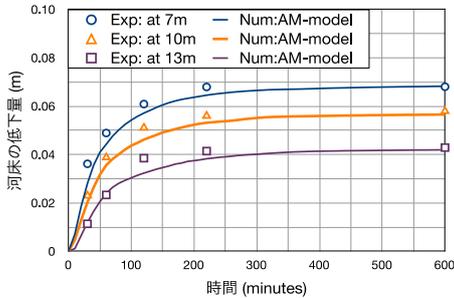


図-1 貯留層での粒度比率 $F_{b_j}(z)$ の取り扱い



(a) 粒度分布と解析結果



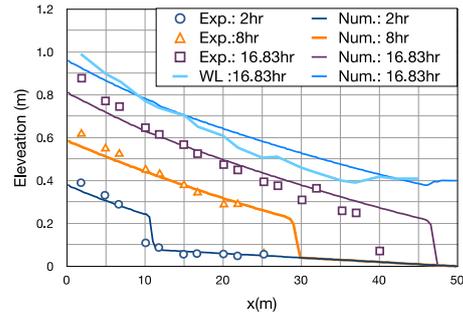
(b) 河床低下量の経過時変化

図-2 粗粒化を伴う河床低下の実験結果に基づく検証結果

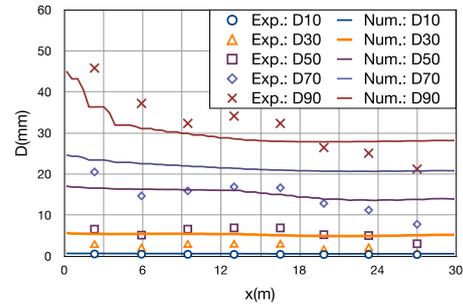
掃流砂、河床低下時には河床表層下の粒度分布の影響を考慮できることが特徴である。

流れと混合砂礫河床変動の基礎方程式の離散化は、いずれも有限体積法(FVM)に基づき行い、時間積分には Euler の陽解法を、数値流束には近似リーマン解法の一つで HLL(Harten, Lax and van Leer)の数値流束より数値拡散が小さい HLLC(Harten, Lax, van Leer Contact)を、河床変動の数値流束と粒度比率の数値流束には風上差分を用いた。また、貯留層での粒度比率については、図-1 に示すように貯留層と基岩層との間を M 個のソロバン格子で分割し、各格子点での粒度比率を次のように求めた。ただし、ソロバン格子の格子点の再配置については、各格子幅が等間隔となるように行った。計算セルには三角形の非構造格子を用いた。

本モデルを①粗粒化を伴う河床低下および②細粒化を伴う河床上昇の実験に適用し、その基本性能の検証を行った。図-2 と 3 に検証結果の一例を示す。その結果、①適切なパ



(a) 河床高



(b) 粒径

図-3 細粒化を伴う河床上昇の実験結果に基づく検証

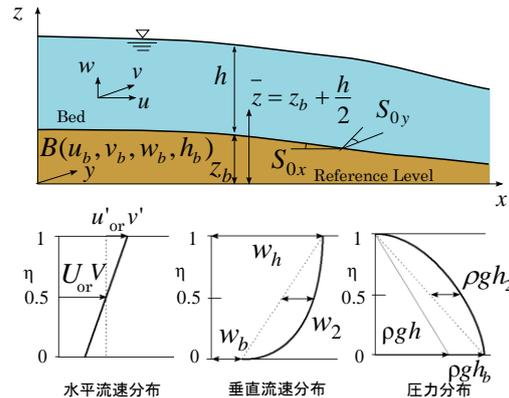
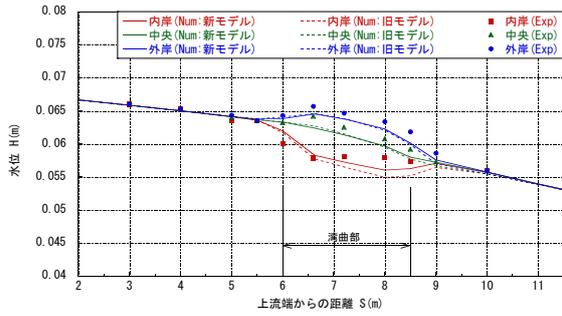
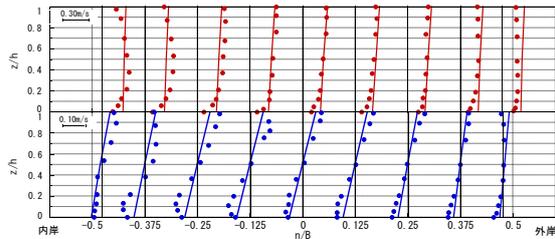


図-4 準3次元自由表面流モデルの定義図

ラメータ値を用いることで、河床低下による **armouring** を適切に再現できることが確認された。また、いずれのモデルも粒度比率が 0~1 の範囲に収まらないなどの問題は発生しておらず、同モデルが安定して計算が継続できること、②堆砂フロントが進行するプロセスや流下とともに細粒化するプロセスを再現していること、水面形から明らかなように跳水が発生しているにもかかわらず、安定した計算が行えていること、いずれのモデルも流入部付近とフロント部分で差異はあるが河床高の実験結果を概ね再現していること、一方で粒径の縦断変化については、 D_{90} の縦断変化は再現しているものの、 $D_{30} \sim D_{70}$ については過大評価すること、などが確認された。また、交換層と貯留層での粒度比率の求め方に課題が残ることも確認された。

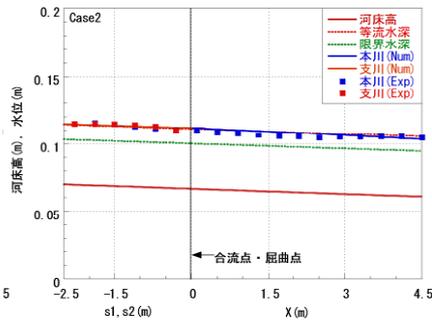


(a) 水面形

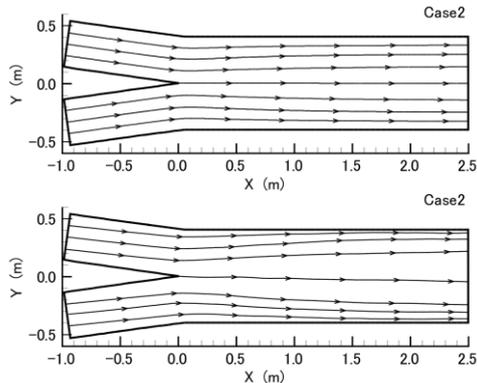


(b) 主流および2次流の流速分布

図-5 一様湾曲流れの実験結果に基づく検証 (プロット: 実験値, ライン: 解析結果)



(a) 水面形

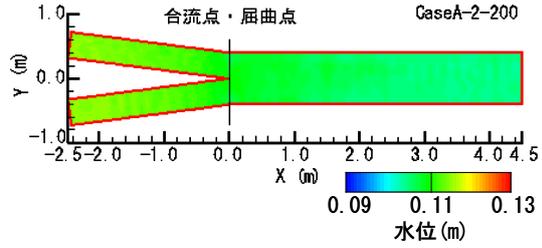


(b) 底面流線(上: 解析結果, 下: 実験値)

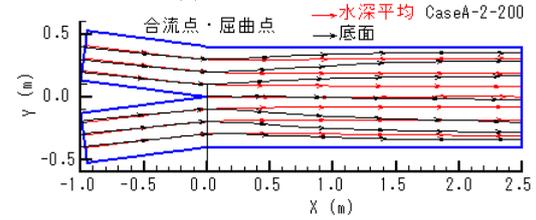
図-6 河川合流点周辺の流れの実験結果に基づく検証

(2) 準3次元自由表面流モデルの開発と予測精度の検証

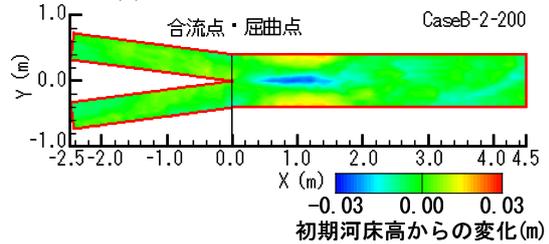
河床変動を予測する上で底面付近の流速を予測することが重要であることから、ここでは有限体積法に基づく近似リーマン解法に基づき、非静圧力分布と鉛直方向流速を考慮した新たな準3次元自由表面流モデルを構築した。



(a) 水位コンター



(b) 水深平均流線と底面流線



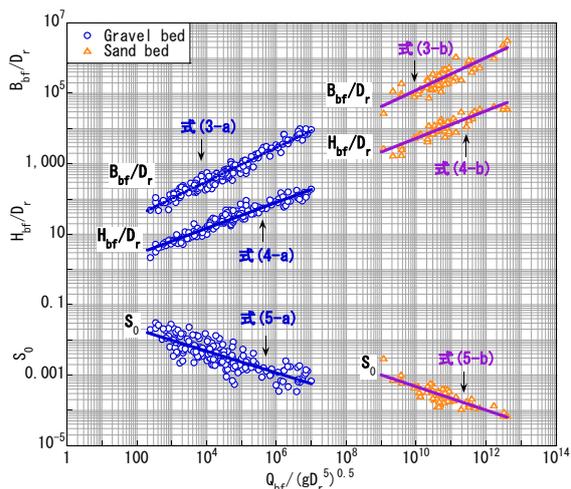
(c) 河床高コンター

図-7 河川合流点周辺の流れと河床変動の実験データの一例

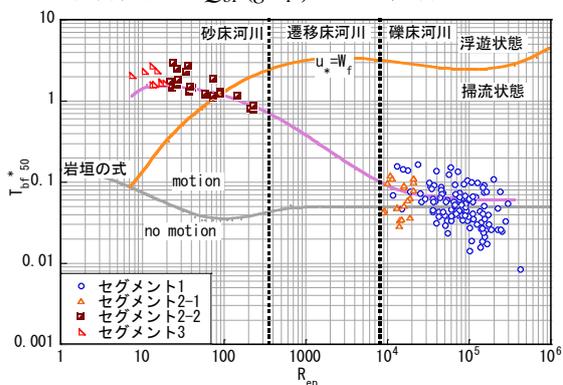
基礎方程式は、図-4 に示すように、 x , y 軸方向の流速 u , v の鉛直分布を線形近似、 z 軸方向の流速 w の鉛直分布を放物近似、圧力 p の鉛直分布を放物線近似し水深積分を行うことで求められる水深平均の連続の式と運動方程式に加え、半水深高さをを用いた関数 Ψ を重み関数として水深積分することで導かれるモーメント方程式、底面、水面での境界条件の10個の方程式である。

これらの方程式を①水深平均の諸量に関する方程式と②鉛直方向および非静水圧項に関する方程式とに分けて離散化を行った。いずれの方程式についても空間積分については有限体積法に基づき、時間積分については Euler の陽解法を用いた。①には近似リーマン解法の一つである HLL(Harten, Lax and van Leer)の数値流束を、②には中心差分に対応する数値流束を用いた。

本モデルを一様湾曲流れと河川合流点周辺の流れの実験結果に基づき、その予測精度の検証を行った。その一例を図-5と6に示す。これらより、本モデルが、2次流の発達・減衰過程を適切に取り扱うことが可能であり、一様湾曲流れと河川合流点の流れを概ね良好な精度で再現できること、底面付近の流れを適切に取り扱えることなどが、確認された。



(a) 無次元低水路満杯川幅 B_{br}/D_r , 無次元低路満杯水深 H_{br}/D_r および河床勾配 S_0 と無次元低水路満杯流量 $Q_{br}/(gD_r^5)^{0.5}$ との関係



(b) 低水路満杯時の Shields 数 τ_{br}^* と粒子 Reynolds 数 $Re_p=(sgD_r^3/\nu)$ との関係

図-8 日本および海外の実河川データに基づき、安定した河道の川幅、水深、河床勾配および代表粒径のデータの一例

(3) モデルの検証のための実験データと現地データの収集

上記の平面 2 次元混合砂礫河床変動モデルと準 3 次元洪水流モデルの検証のためのデータとして、①同規模河川が合流する河川を模した実験での水深、水表面・水深平均・底面流速、河床高に関する実験データと②日本および海外の実河川データに基づき、安定した河道の川幅、水深、河床勾配および代表粒径のデータを収集・整理した。①と②のデータの一例をそれぞれ図-7 と 8 に示す

(4) 成果のまとめ

本研究で得られた成果は次の通りである。

- ① 有限体積法と近似リーマン解法を用いて、掃流砂と河床表層下の粒度分布が交換層の粒度比率に及ぼす影響を考慮した上で、河床高と表層と下層の粒度分布の変化を

予測する平面 2 次元混合砂礫河床変動モデルを新たに構築し、河床低下による **armouring** や、常射流混在下での河床材料の細粒化を伴う河床上昇の実験結果に適用し、その予測精度を検証した。その結果、本モデルは、従来のモデルに比べ高い精度で、同現象を再現することができるが、交換層と貯留層での粒度比率の求め方に課題が残ることがわかった。

- ② 有限体積法に基づく近似リーマン解法に基づき、非静圧力分布と鉛直方向流速を考慮した新たな準 3 次元自由表面流モデルを構築し、湾曲部や河川合流点周辺の流れの実験結果に基づき検証した。その結果、同モデルは、水深、流速に加え、湾曲部や河川合流点での河床変動を予測する上で底面付近の流速を予測可能であることがわかった。
- ③ 上記の①と②のモデルを検証する上で不可欠な実験データおよび現地データの収集と整理を行った。
- ④ 以上から、平面 2 次元混合砂礫河床変動モデルに上記①のような改善点は残るが、このようなモデルをベースとし、②の準 3 次元自由表面モデルを組み合わせることで、水衝部の深掘れ、滞筋の固定化、河道内の樹林化などの対策を検討する上で有用な情報、つまり治水と環境とが調和した川づくりに関する有用な情報を提供可能なモデルを構築できると考えられる。今後は、そのようなモデルを構築し、③の実験結果に基づき検証するとともに、石礫河川の河床変動モデルを組み込むことで、「流系一環とした総合的土砂管理」に不可欠な河道の上流域から下流域までの土砂動態に関する情報を提供できるようにしたいと考えている。

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 10 件)

- ① 坂本 洋, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 準 3 次元洪水流モデルを用いた同規模河川合流点流れの数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 第 68 巻, 2012, I_841-I_846.
- ② 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本 洋, 混合砂礫河床変動モデルの構築と粗粒化・細粒化を伴う河床変動への適用, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 第 68 巻, 2012, I_1189-I_1194.
- ③ 新谷恭平, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本

- 洋, 同規模河川合流点の準3次元解析, 平成23年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2012, pp.213-214
- ④ 坂本 洋, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 池田寛, 近似リーマン解法を用いた準3次元洪水流モデルの開発と河川合流点流れへの適用, 水工学論文集, 査読有, 第55巻, 2011, pp.S_1225-S_1230.
- ⑤ 池田 寛, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本洋, 準3次元モデルを用いた河川合流点流れの数値解析, 平成22年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2011, pp.163-164.
- ⑥ 橋立広隆, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本洋, 池田 寛, 同規模河川の合流点周辺の流況と河床変動特性, 平成22年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2011, pp.165-166.
- ⑦ 岡田和樹, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 上田和也, 砂礫河川の安定な低水路断面形状に関する研究, 平成22年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2011, pp.203-204.
- ⑧ 重枝未玲, 秋山壽一郎, 森山拓士, 池田 寛, 合流後の流況が河川合流部周辺の流れと河床変動に及ぼす影響, 水工学論文集, 査読有, 第54巻, 2010, pp.799-804.
- ⑨ 池田 寛, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 森山拓士: 河川合流部周辺での流れと河床変動に関する研究, 平成21年度土木学会西部支部研究発表会, 査読無, 2010, pp.197-198.
- ⑩ 三木一利, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 上田和也: 蛇行流路の形成過程の数値シミュレーション, 平成21年度土木学会西部支部研究発表会, 査読無, 2010, pp.203-204.

[学会発表] (計10件)

- ① 坂本 洋, 準3次元洪水流モデルを用いた同規模河川合流点流れの数値解析, 第56回水工学講演会, 2012年3月8日, 愛媛大学.
- ② 重枝未玲, 混合砂礫河床変動モデルの構築と粗粒化・細粒化を伴う河床変動への適用, 第56回水工学講演会, 2012年3月8日, 愛媛大学.
- ③ 新谷恭平, 同規模河川合流点の準3次元解析, 平成23年度土木学会西部支部研究発表会, 2012年3月3日, 鹿児島大学.
- ④ 坂本 洋, 近似リーマン解法を用いた準3次元洪水流モデルの開発と河川合流点流れへの適用, 第55回水工学講演会, 2011年3月8日, 東京大学生産技術研究.
- ⑤ 池田 寛, 準3次元モデルを用いた河川合流点流れの数値解析, 平成22年度土木学会西部支部研究発表会, 2011年3月5日, 九州工業大学.

- ⑥ 橋立広隆, 同規模河川の合流点周辺の流況と河床変動特性, 平成22年度土木学会西部支部研究発表, 2011年3月5日, 九州工業大学.
- ⑦ 岡田和樹, 砂礫河川の安定な低水路断面形状に関する研究, 平成22年度土木学会西部支部研究発表会, 2011年3月5日, 九州工業大学.
- ⑧ 森山拓士, 合流後の流況が河川合流部周辺の流れと河床変動に及ぼす影響, 第55回水工学講演会, 2010年3月4日, 北海道大学.
- ⑨ 池田 寛, 河川合流部周辺での流れと河床変動に関する研究, 平成21年度土木学会西部支部研究発表会, 2010年3月6日, 崇城大学.
- ⑩ 三木一利, 蛇行流路の形成過程の数値シミュレーション, 平成21年度土木学会西部支部研究発表会, 2010年3月6日, 崇城大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.civil.kyutech.ac.jp/pub/onitsuka/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

重枝 未玲 (SHIGE-EDA MIREI)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 70380730