

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820225

研究課題名(和文)維持管理のための河道縦横断形と質の長期予測を目的とした河床・河道変動モデルの開発

研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODELS FOR LONG TERM FORECAST OF RIVER-BED VARIATION AND ITS GRAIN SIZE DISTRIBUTION TO EXAMINE APPROPRIATE RIVER CHANNEL MANAGEMENT

研究代表者

重枝 未玲 (SHIGE-EDA, Mirei)

九州工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70380730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：河川改修後の維持管理シナリオの検討に資する長期的な河道の縦横断形と質の予測が可能な河床・河道変動モデルの開発を目的として、平面2次元・準3次元混合砂礫河床変動モデル、河道特性を考慮した高効率な洪水流数値モデルである準平面2次元洪水流モデルを構築した。河川分・合流点での実験結果や出水の実測データに基づき、これらのモデルの検証を行うとともに、洪水と河床変動を一体的に取り扱った河床変動解析によって、平成24年九州北部豪雨災害で被害を受けた彦山川の長期的な河床・河道変動を定性的に再現可能なこと、出水時の水位を再現可能なことを明らかにするとともに、河道の経年変化を併用した被災箇所推定の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Quasi 3D and 2D numerical model for flood flows, river-bed variation and its grain size distribution as well as quasi 2D numerical model for flood flows were developed to examine appropriate river channel management. The model for sediment transport linked grain size distributions in the bed load, surface layer and subsurface with the gravel transfer function. These model were based on finite volume method using numerical flux based on HLLC or FDS scheme. These models were verified against experimental data of flows and bed variation or observed water level and flood mark on the flood event. It showed that these models had ability to reproduce the behavior of flood flows and bed variation, but the more improvement were needed to predict it with reasonable accuracy. The disaster process of revetments in the Hikosan river were also examined through a field survey and numerical simulations of flood flow and the temporal river-bed variation.

研究分野：数値流体力学

キーワード：河道の維持管理 長期予測 準3次元河床・河道変動モデル 平面2次元河床・河道変動モデル 準平面2次元洪水流モデル 河道分・合流点

1. 研究開始当初の背景

近年、河川の維持管理は本格的な計画管理へと移行している。適切な維持管理を行うためには、必要な安全度を保つための掘削や洗掘対策などを、どの区間で、どのタイミングで、どの程度行うかを明らかにすることが不可欠である。このような検討を行うためには、(1)流域からの生産土砂の量と質(粒度分布)、(2)河道での土砂流送による河道縦横断面形と質(粒度分布)の変化の予測を数～数十年間の時間規模で行い、平均河床高・最深河床高・最深河床位置から、砂州の肥大化や滯筋の深掘れなど、河道のどの区間が堆積あるいは洗掘傾向にあるのかなどのシナリオをあらかじめ想定することが不可欠である。

このようなシナリオ想定には、流域での土砂生産による供給土砂量に加え、混合粒径河床での河床変動、出水時の流量、河床勾配や河床材料などに応じて生じる砂州の形成や発達、流砂の分級、河岸侵食、さらには出水規模、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予測する必要がある。そのためには、(a) 供給土砂量、(b) 混合粒径砂河床の河床変動・分級作用、(c) 砂州の形成とそれに伴う陸化、(d) 河岸侵食、(e) 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、(f) 河川の合流や分流点での流れや土砂特性の変化、(g) 安定河道に至るまでのプロセスを適切に取り扱うことが可能なツールが必要になる。

実務では、(a)には平衡状態と見なせる河道区間の土砂流送量や実測土砂量を上流端の供給土砂量を与え、(b),(e),(g)を考慮した1次元河床変動解析を用い、(c),(d),(f)の影響を陰的に含む既往最大の洗掘深などの実測データを援用しながら、経験的に最大洗掘深などの横断面変化の諸量を求めている。このような方法は過去のデータが蓄積されている河道については適用できるが、実測値が存在しない河道改修後の河床と河道変動のシナリオを想定することは難しい。また、1次元、準2次元、平面2次元、準3次元河床変動モデルが数多く開発されているものの、上記の(a)～(g)の全てを検討されたモデルは存在しておらず、河道の維持管理を行う上で特に重要な河道横断面形と質の長期的な予測が可能なモデルは存在しない。

2. 研究の目的

本研究は、以上のような背景を踏まえ、河川改修後の維持管理シナリオの検討に資する長期的な河道の縦横断面形と質(粒度分布)の予測が可能な河床・河道変動モデルの開発を最終的な目的としている。ここでは、上記を構成するモデルとして、(1)準3次元混合砂礫

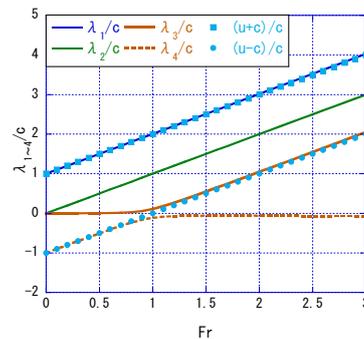


図-1 流れと河床波の特性速度

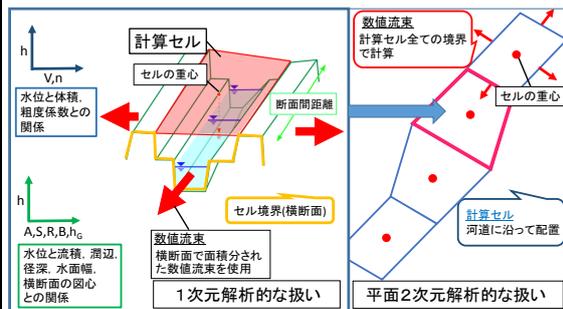


図-2 準平面2次元モデルの概念図

河床変動モデル、準平面2次元洪水流モデルの開発、(2)河川分流・合流点を含む実験結果に基づく準3次元混合砂礫河床変動モデルの検証、(3)平成24年九州北部豪雨災害時に被害を受けた山国川や彦山川の出水の実測データに基づく、準3次元・準平面2次元洪水流モデルと既存の平面2次元混合砂礫河床変動モデルの検証を行った。

3. 研究の方法

上記の研究目的(1)～(3)に関する研究方法は次の通りである。

(1) 数値モデルの開発

長期的な河道の縦横断面形と質(粒度分布)の予測が可能な河床・河道変動モデルの構成モデルとなる準3次元混合砂礫河床変動モデル、準平面2次元洪水流モデルの開発を行った。

a) 流れと河床変動の相互作用を考慮した離散化手法の必要性についての検討

流れと河床変動の基礎方程式が双曲型の偏微分方程式であることを踏まえ、図-1に示すような流れと河床波の特性速度とその相互作用を考慮した離散化の必要性について検討した。

b) 準3次元混合砂礫河床変動モデルの開発

上記 a)の検討結果を踏まえ、改良を加えた準3次元洪水流モデルと混合砂礫河床変動モデルとを統合し、新たな準3次元混合砂礫河床変動モデルの構築に取り組んだ。

c) 準平面2次元洪水流モデルの開発

長期的な河道の縦横断面形と質(粒度分布)の

予測を目的とした数値モデルのベースモデルとして、河道特性を考慮できかつ高効率な洪水流数値モデルを構築した。図-2に示すように、計算セルを河道線形に沿って配列することで、平面2次元モデルのように河道特性を考慮し、セル境界の数値流束には、横断面で面積分された数値流束を用いることで、1次元モデルのように高い計算効率で解析を行うことが可能な準平面2次元洪水流モデルの構築に取り組んだ。

(2) 河川分流・合流点の実験結果に基づく準3次元混合砂礫河床変動モデルの検証

準3次元混合砂礫河床変動モデルの検証を目的として、河川分流点での流れと砂礫混合河床での河床変動下と分・合流部での固定床と一様砂河床での河床変動下での水位、流速、河床高、分流量・流砂量の実験データの収集および整理を行った。これらのデータに基づき、準3次元混合砂礫河床変動モデルの流れと河床変動および河床の質の変化の予測精度を検証した。

(3) 実河川の実測データの収集とこれらに基づく数値モデルの検証

準3次元・準平面2次元洪水流モデルおよび平面2次元混合砂礫河床変動モデルの検証を目的に、平成24年九州北部豪雨災害時に被害を受けた彦山川の河床・川幅・河床材料および河道の経年変化などの実河川のデータの収集および整理を行った。これらに基づき、準3次元・準平面2次元洪水流モデルについては流れの予測精度を平面2次元混合砂礫河床変動モデルについては流れと河床変動の予測精度を検証した。

4. 研究成果

上記の研究目的(1)~(3)に関する研究成果は以下の通りである。

(1) 数値モデルの開発

a) 流れと河床変動の相互作用を考慮した離散化手法の必要性についての検討

流れと河床変動の基礎方程式をシステム方程式として取り扱い、近似リーマン解法の一つであるHLL法を用いて流れと河床変動の特性速度を考慮することで、流れと河床変動の相互作用を考慮した新たな河床変動モデル(model-A)と流れと河床変動の相互作用を無視した数値モデル(model-C)を構築した。移動床での1次元および2次元ダム破壊流れの実験結果に基づき、両モデルの予測精度を比較した結果、いずれのモデルも予測精度が十分であることが確認された。図-3に解析結果の一例を示す。これより、流れと河床変動の相互作用を無視した離散化を用いた場合

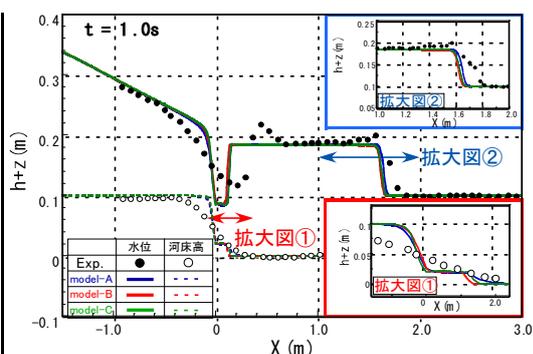


図-3 移動床での1次元ダム破壊流れの実験結果に基づくモデルの検証

でも十分な精度を有していることが確認された。

b) 準3次元混合砂礫河床変動モデルの開発

準3次元混合砂礫河床変動モデルを構築した。準3次元混合砂礫河床変動モデルの基礎方程式は、連続の式と運動方程式およびモーメント方程式、全粒径の流砂の連続の式と交換層の概念に基づく粒径別の流砂の連続の式から導かれる交換層での粒度比率 F_j の時間変化の方程式である。流れと河床変動の基礎方程式の離散化は、上記の4.(1)の検討結果を踏まえ、別々に行った。いずれの方程式の離散化も有限体積法に基づき行い、時間積分にはEulerの陽解法を、連続の式と運動量・モーメントの保存式の数値流束には、HLLC法に河床勾配の取り扱いを組み込んだ数値流束を、河床変動の数値流束と粒度比率の数値流束には、それぞれ風上型の数値流束を用いた。

同モデルを実河川へ適用した場合に、底面摩擦が非現実的な大きさとなり、数値振動が発生し計算の継続ができない問題が生じていた。これについては、底面摩擦によるエネルギー損失が流れの運動エネルギーを超えない処理を加えることで解析の実行が可能となった。

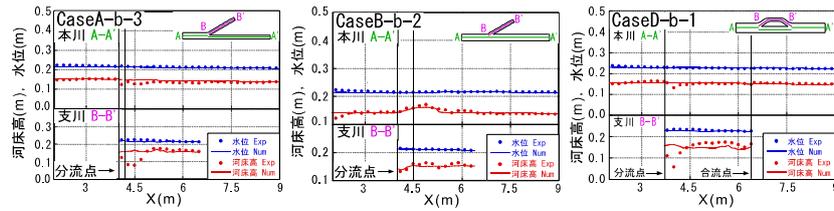
c) 準平面2次元洪水流モデルの開発

準平面2次元洪水流モデルを構築した。準平面2次元洪水流モデルの基礎方程式は、積分形の2次元浅水方程式である。同モデルでは、①河道線形に沿って計算セルを配置し、②計算セルをコントロールボリュームとして、計算セル境界の法線方向に対して、セル境界の横断面で面積分された数値流束を算定し、③全てのセル境界線に対して数値流束を線積分することで、計算セル内の体積、流速と体積との積を算定し、水深と流速の予測を行う。

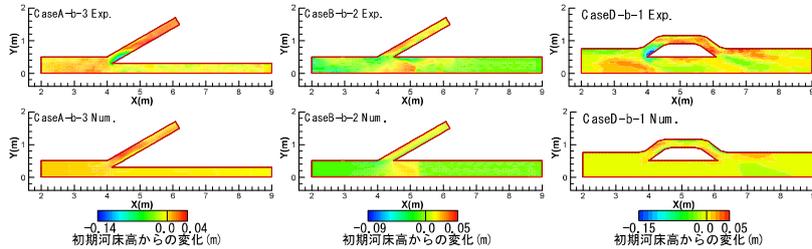
(2) 河川分流・合流点の実験結果に基づく準3次元混合砂礫河床変動モデルの検証

準3次元混合砂礫河床変動モデルを分・合

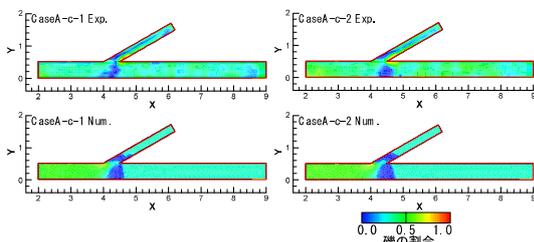
・水面・河床形状



・河床位コンター



・礫の割合



・分派流量

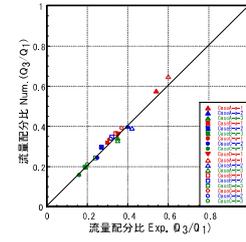


図-4 河川分流・合流点の実験結果に基づく準 3 次元混合砂礫河床変動モデルの検証

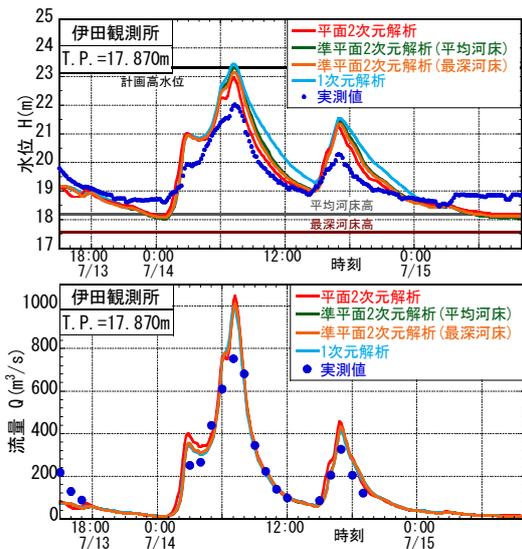


図-5 準平面 2 次元洪水流モデルの検証

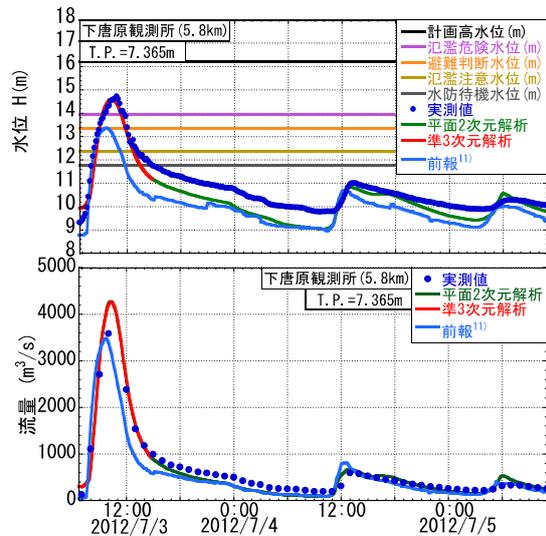


図-6 準 3 次元洪水流モデルの検証

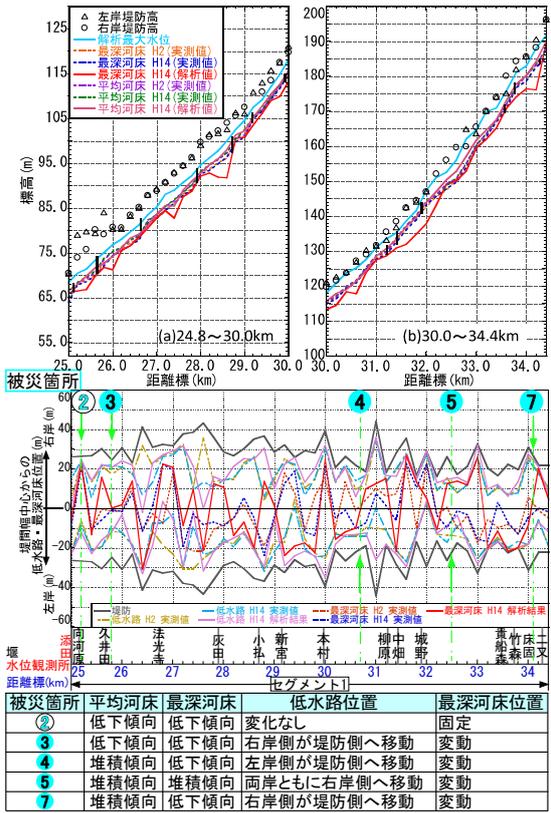
流点周辺の様砂および分流点周辺の混合砂礫河床での移動床実験結果に適用し検証した。その結果、同モデルは、図-4 に示すように、分・合流点周辺の流れと河床変動、河床の質、分派流量を概ね再現可能であること、一方で、局所洗掘等を再現できないために、分派流砂量等の再現に問題が残ることが確認された。

(3) 実河川の実測データの収集とこれらに基づく数値モデルの検証

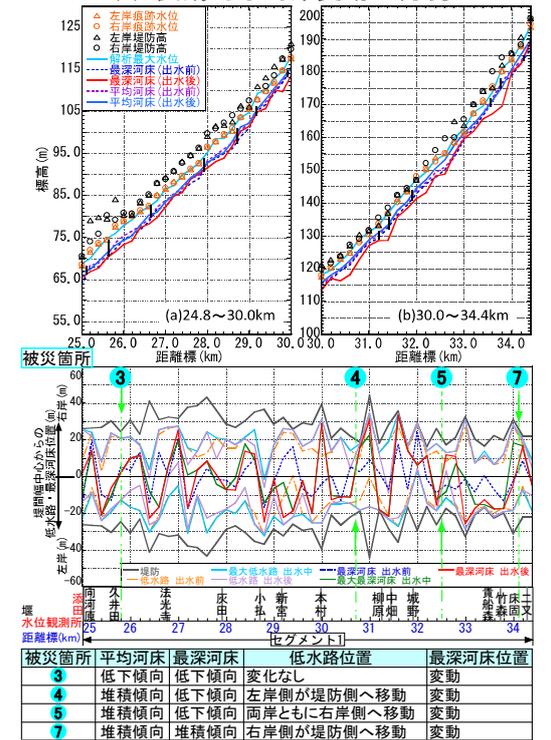
彦山川の昭和 62 年、平成 2, 14, 20, 23 年の定期横断測量結果に基づき、各年度の平均・最深河床の差、堤間中心からの低水路・

最深河床位置の経年変化を整理した。また、山国川については、平成 24 年九州北部豪雨災害時の出水データを整理した。

準平面 2 次元洪水流モデルは、平成 24 年九州北部豪雨災害時の彦山川の出水の実測結果に基づき検証した。図-5 に示すような彦山川での解析結果に基づく検討から、本平面 2 次元洪水流モデルは、1 次元解析より予測精度は高く、平面 2 次元解析より予測性精度は劣るものの、複数の支川が合流する河川での水位ハイドログラフを予測可能であること、平面 2 次元解析に比べ、その計算効率は 1,200 倍程度であること、河床高に平均河床高、最深河床高を用いても、同程度の精度で



(a) 長期的な河床変動の再現



(b) 平成 24 年 7 月 13, 14 日豪雨の洪水の再現
図-7 平面 2 次元混合砂礫河床変動モデルの彦山川への適用

予測が可能なこと、などが確認された。
準 3 次元洪水流モデルは平成 24 年九州北部豪雨災害時の山国川の出水の実測結果に基づき検証した。図-6 に示すような山国川での解析結果に基づく検討から、本準 3 次元混合砂礫洪水流モデルは、山国川での痕跡水位、

水位・流量ハイドログラフをある程度再現できること、ただし、同モデルの解析には多大な計算時間が必要となるため、この数値モデルを用いた河床・河道変動解析の実行には、計算効率の向上が不可欠であること、などが確認された。

最後に、準 3 次元混合砂礫河床変動モデルのベースとした平面 2 次元混合砂礫河床変動モデルを、彦山川へ適用し、河床・河道の経年変化に基づく長期的な河床変動と平成 24 年 7 月 13, 14 日豪雨の出水に基づく流れと河床変動の再現性を検討した。その結果、図-7 に示すように同モデルが、河床・河道の変動を定性的であるが再現できること、平成 24 年九州北部豪雨災害時の彦山川の解析水位を再現できることが確認された。さらに、河道の経年変化と同モデルの河床・河道変動の解析結果から、被災箇所の共通点の抽出を行うことで、被災箇所の推定できる可能性を示した。

(4) 今後の課題

今後は、準 3 次元河床混合砂礫河床変動モデルの計算効率の向上、準平面 2 次元混合砂礫河床変動モデルを構築するとともに、両モデルを統合したハイブリッドモデルを構築することで、河川改修後の維持管理シナリオの検討に資する長期的な河道の縦横断面と質(粒度分布)の予測が可能な河床・河道変動モデルと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 14 件)

- ① 重枝未玲, 秋山壽一郎, 平松裕樹, 阿部琢哉, 矩形一様断面水路での水面形の経時変化による流量ハイドログラフの推定法, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.72, No.4, 2016, pp.I 607-I 612.
- ② 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本洋, 大久保剛貴, 中木翔也, HLLC 法による彦山川の平面 2 次元洪水流解析と FDS 法との比較, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.72, No.4, 2016, pp.I 619-I 624.
- ③ 田口英司, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 阿部琢哉, 多点水位観測値を用いた矩形一様断面水路における流量の推定法, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2016, pp.103-104.
- ④ 平松裕樹, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 阿部琢哉, 機械学習による彦山川の護岸・河岸の被災危険度評価, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2016, pp.163-164.
- ⑤ 大久保剛貴, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本洋, HLLC 法に基づく平面 2 次元数値モデルを用いた彦山川の洪水流解析, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会講

- 演概要集, 査読無, 2016, pp.167-168.
- ⑥ 中木翔也, 重枝未玲, 秋山壽一郎, Adelaida Castillo DURAN, 彦山川流域を対象にした準平面 2 次元洪水流解析, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2016, pp.169-170.
- ⑦ 重枝未玲, 秋山壽一郎, 川上 優, 圧力流・自由表面流混在流れの準平面 2 次元数値モデルの構築, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.71, No.4, 2015, pp.I_571-I_576.
- ⑧ 重枝未玲, 秋山壽一郎, 平松裕樹, 松本拓磨, 平成 24 年豪雨災害時の彦山川の護岸・河岸の被災プロセスの検討, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.71, No.4, 2015, pp.I_1399-I_1404.
- ⑨ 川上 優, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 松本拓磨, 準平面 2 次元数値モデルを用いた圧力流・自由表面流混在流れの数値解析, 平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2015, pp.153-154.
- ⑩ 阿部琢哉, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 平松裕樹, 平成 24 年九州北部豪雨での彦山川の護岸・河岸の被災プロセス, 平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2015, pp.159-160.
- ⑪ 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本 洋, 新谷恭平, 近似リーマン解法を用いた非構造平面 2 次元河床変動モデルの構築, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.70, No.4, 2014, pp.I_811-I_816.
- ⑫ 坂本 洋, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 新谷恭平, 準 3 次元数値モデルによる河川分流出点周辺の河床変動シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.70, No.4, 2014, pp.I_1009-I_1014.
- ⑬ 平松裕樹, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本洋, 河川分流出点周辺の準 3 次元河床変動シミュレーション, 平成 25 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2014, pp.153-154.
- ⑭ 松本拓磨, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本洋, 流れと河床変動の相互作用を考慮した平面 2 次元河床変動モデルの構築, 平成 25 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 査読無, 2014, pp.157-158.
- ④ 平松裕樹, 機械学習による彦山川の護岸・河岸の被災危険度評価, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会, 2016 年 3 月 6 日, 九州産業大学.
- ⑤ 大久保剛貴, HLLC 法に基づく平面 2 次元数値モデルを用いた彦山川の洪水流解析, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会講演, 2016 年 3 月 6 日, 九州産業大学.
- ⑥ 中木翔也, 彦山川流域を対象にした準平面 2 次元洪水流解析, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会, 2016 年 3 月 6 日, 九州産業大学.
- ⑦ 重枝未玲, 圧力流・自由表面流混在流れの準平面 2 次元数値モデルの構築, 土木学会論文集 B1(水工学), 第 59 回水工学講演会, 2015 年 3 月 11 日, 早稲田大学.
- ⑧ 平松裕樹, 平成 24 年豪雨災害時の彦山川の護岸・河岸の被災プロセスの検討, 第 59 回水工学講演会, 2015 年 3 月 12 日, 早稲田大学.
- ⑨ 川上 優, 準平面 2 次元数値モデルを用いた圧力流・自由表面流混在流れの数値解析, 平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会, 2015 年 3 月 7 日, 琉球大学.
- ⑩ 阿部琢哉, 平成 24 年九州北部豪雨での彦山川の護岸・河岸の被災プロセス, 平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会, 2015 年 3 月 7 日, 琉球大学.
- ⑪ 重枝未玲, 近似リーマン解法を用いた非構造平面 2 次元河床変動モデルの構築, 第 58 回水工学講演会, 2014 年 3 月 6 日, 神戸大学.
- ⑫ 坂本 洋, 準 3 次元数値モデルによる河川分流出点周辺の河床変動シミュレーション, 第 58 回水工学講演会, 2014 年 3 月 5 日, 神戸大学.
- ⑬ 平松裕樹, 河川分流出点周辺の準 3 次元河床変動シミュレーション, 平成 25 年度土木学会西部支部研究発表会, 2014 年 3 月 5 日, 福岡大学.
- ⑭ 松本拓磨, 流れと河床変動の相互作用を考慮した平面 2 次元河床変動モデルの構築, 平成 25 年度土木学会西部支部研究発表会, 2014 年 3 月 5 日, 福岡大学.

[その他]

ホームページ等

<http://www.civil.kyutech.ac.jp/pub/mirei/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

[学会発表] (計 14 件)

- ① 阿部琢哉, 矩形一様断面水路での水面形の経時変化による流量ハイドログラフの推定法, 第 60 回水工学講演会, 2016 年 3 月 16 日, 東北工業大学.
- ② 重枝未玲, HLLC 法による彦山川の平面 2 次元洪水流解析と FDS 法との比較, 第 60 回水工学講演会, 2016 年 3 月 16 日, 東北工業大学.
- ③ 田口英司, 多点水位観測値を用いた矩形一様断面水路における流量の推定法, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会, 2016 年 3 月 6 日, 九州産業大学.