

## 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25年 6月 3日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22246067

研究課題名（和文） 石礫・砂礫河川の土砂動態の解明と河床高回復・維持技術の研究

研究課題名（英文） Mechanism of sediment transport and channel maintenance method in stony bed rivers

研究代表者

福岡 捷二 (FUKUOKA SHOJI)

中央大学・研究開発機構・教授

研究者番号：30016472

研究成果の概要（和文）：

本研究では、石礫・砂礫河川の土砂移動を取り扱うためには、河床表層に存在する大きな石とそれらが構成する凹凸構造を考慮に入れることが不可欠であることを明らかにし、現地実験に基づく新しい河床変動解析法を提案した。この解析法を応用した水面形の観測結果を用いた洪水流・河床変動の一体解析法は土砂動態の解明や河道の維持管理において有効であることを示した。また、河道湾曲・蛇行部や構造物の周辺の三次元流れを解析できる準三次元解析法を提案し、室内実験や現地実験結果への適用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This study clarified the significant roles of boulders and large stones on bed variations in stony bed rivers and proposed the new calculation method based on the large scale field experiments. Then, this study presented appreciations of the method by using observed water level profiles for revealing flood phenomena and considering river maintenance. This study also developed the quasi-three dimensional method for flow and demonstrated its applicability to three dimensional flows in small scale laboratory channels and large scale field experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	15,200,000	4,560,000	19,760,000
2011年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2012年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
年度			
年度			
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

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：河道設計，洪水流，観測，環境，石礫河川，減災，土砂災害，河床変動

## 1. 研究開始当初の背景

わが国は、国土に占める山地の割合が高く、大きな石から砂までの広い粒度分布で構成される急流の石礫河川が多く存在する。急流石礫河川では、洪水時の激しい流れにより、河床変動や濘筋変動が大きいため、河岸際の河床洗掘や河岸侵食による河川災害が生じ

やすい。また、上流域からの石礫の移動量は中下流域の砂礫河川にも影響する。近年、大きな石の減少により河床の洗掘が進み、河道内の濘筋化・砂州の固定化、河床低下した濘筋部では土丹層（固結度の低い泥岩層）が露出した河道が多くなっており、河道の治水、環境両面で種々の問題を引き起こしている。

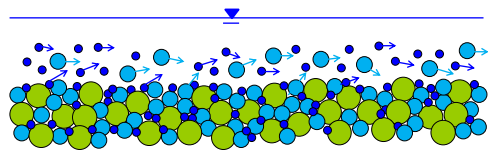


図-1 砂礫河川の土砂移動

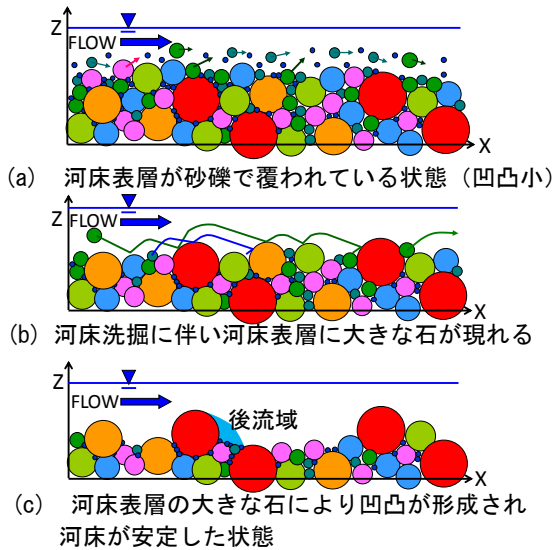


図-2 石礫河川の河床変動過程

このため、石礫河川の河道計画や管理、災害対策の立案のために石礫河川の河床変動量を十分予測できる技術の確立が求められている。

(1) 石礫河川における河床変動の一般的な予測手法として、砂河川、砂礫河川を対象に検討された解析法<sup>1)~4)</sup>がそのまま用いられてきたが、石礫河川の河床変動機構は、砂礫河川とは異なるため、既往の解析法の適用では石礫河川の河床変動を予測することは難しいことが知られている。一方、渓流域に存在するステップ・プールに着目した研究<sup>1),5),6)</sup>が多くなされているが、石礫河川のより広い課題に対しては未解明の点が多い。大きな石を含む広い粒度分布をもつ石礫河川の水理現象は、砂礫河川を対象として行われてきたように、小さなスケールの水理実験では不十分である。研究代表者ら<sup>7)</sup>は、急流石礫河川である常願寺川において大規模な現地実験を実施した。この結果、石礫河川では、洪水水中においても移動しない巨石等の大きな河床材料が、河床安定および小さな粒径集団の土砂移動に大きく影響していることが明らかとなり(図-1, 2)、これを考慮に入れた解析法の構築が不可欠であることを示した。

(2) 一方、洪水流・河床変動解析法は、観測された流量ハイドログラフを上流端境界条件に用いて解析が行われる。しかし、河床変動・滯筋変動の激しい石礫河川では、洪水水中の観測流量は極めて労力が大きく精度が低い問題がある。洪水時の河床変動現象を明らかにするためには、河床変動解析を観測

精度の高い水面形の時間変化を解とした非定常洪水流解析法と一体的に扱う必要がある<sup>8)</sup>。

(3) 河床変動解析に用いられている平面二次元流解析モデルは河道湾曲・蛇行部、河川構造物周辺等における流れの三次元構造を評価できない問題がある。流速、圧力の鉛直分布を計算する三次元解析モデルは計算負荷が著しく大きく、実用的でないため、流れの三次元性が考慮できる実用的な解析モデルが必要である。

## 参考文献

- 1) 長谷川和義, 溪流の淵・瀬の水理とその応用, 水工学シリーズ, 97-A-9, 土木学会水理委員会, pp.1-20, 1997.
- 2) 国土政策技術研究所: 健全な水循環系・流砂系の構築に関する研究, 国土政策技術研究所プロジェクト研究報告, 第16号, 2007.
- 3) Egiazaroff, I.V.: Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, Vol.91, HY4, pp.225-247, 1965.
- 4) 平野宗夫: Armoring を伴う河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971.
- 5) Whittaker, J.G. and M.N.R. Jaeggi, Origin of step-pool systems in mountain streams, Journal of Hydraulics Division, Proc. of ASCE, pp.758-773, 1982.
- 6) 江頭進治, 芦田和男, 澤田豊明, 西本直史: 階段状河床波と流砂の挙動, 第30回水理講演会論文集, pp.223-228, 1986.
- 7) 例えば, 福岡捷二, 長田健吾, 安部友則: 石礫河川の河床安定に果たす石の役割, 水工学論文集, 第53巻, pp.643-648, 2008.
- 8) 福岡捷二: 洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術, 河川技術論文集, 第12巻, pp.1-6, 2006.

## 2. 研究の目的

(1) 石礫河川の河床変動においては河床に存在する大きな石が重要な役割を持つ<sup>7)</sup>。本研究では、常願寺川現地実験により石礫河川の河床の凹凸構造とそれが流れと石礫の運動に及ぼす影響を明らかにするとともに、これらを考慮できる石礫河川の河床変動解析モデルを構築する。

(2) 洪水時の石礫河川の河床変動現象を明らかにするために、観測水面形の時間変化を用いた洪水流・河床変動の一体解析法を構築する。構築した解析法により、巨石を用いた石礫河川の洗掘対策法を検討する。

(3) 河川における蛇行部、合流部や護岸・水制等の構造物周辺の局所的な流況を実用的に解析できる準三次元解析法を開発し、検証する。

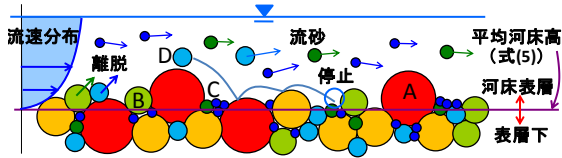


図-3 石礫河川の河床変動解析法の河床、流れと流砂（離脱・流下・堆積）の関係

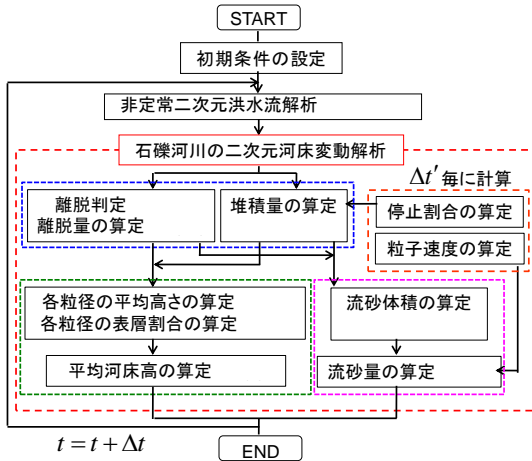


図-4 石礫河川の河床変動解析法の河床、流れと流砂（離脱・流下・堆積）の関係

### 3. 研究の方法

(1) 石礫河川は河床変動では大きな石により構成される河床の凹凸が流れの抵抗と河床材料の移動に大きな影響を及ぼす。また、石礫河川の河床の安定には、大きな石の配置および石の形状が重要な要素となる。本研究では常願寺川現地実験により表層石礫の凹凸分布を詳細に調査し、これを組み込んだ石礫河川の二次元河床変動解析法を構築し、常願寺川現地実験結果と比較した。図-3は新しい二次元河床変動解析法で想定した石礫河川における流砂過程、図-4に石礫河川の河床変動解析法の過程を示す。本解析法は、洪水流の水面形の時間変化を解とした非常二次元洪水解析法と石礫河川の二次元河床変動解析法を一体的に扱うものである。本解析法では図-2に示した石礫河川の河床変動現象を扱うために、河床表層の各粒径の平均高さ、表層割合および平均河床高を評価する点に特徴がある。

(2) 石礫河川における洪水時の河床変動予測のために、開発した石礫河川の河床変動解析法を応用し、水面形の時間変化を解とした二次元洪水流・河床変動解析の一体解析法を構築し、以下の課題に応用し、検討した。新宮川水系旭川では、旭ダム貯水池の堆砂、ダム下流河道の砂州の縮小及び瀬と淵の減少といった問題が顕著になったため、平成10年に排砂バイパストンネルが設置された。排砂バイパストンネルにより多くの石礫が下流河道に排出されるようになり、下流河道の

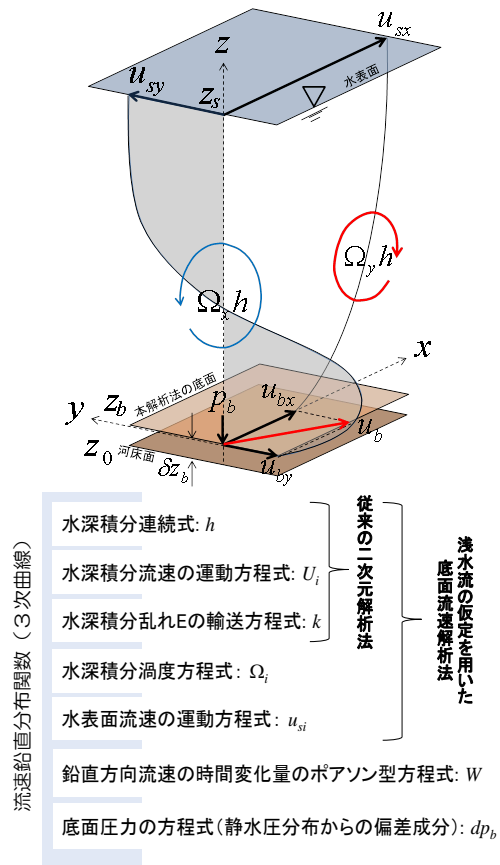


図-5 一般底面流速解析法の枠組みと基礎方程式

瀬と淵が徐々に回復してきている。旭川の洪水流と河床変動を説明できるモデルを構築することは、今後、排砂施設を検討する上で重要である。本研究では、石礫河川の二次元河床変動解析法を、旭川に適用し、排砂バイパストンネルから排出される石礫の排出機構及び下流河道の瀬淵の回復過程について検討した。次に、石礫河川における洗掘対策として、申請者らによって考案された巨石付き盛土砂州の設計法を確立するために、構築した石礫河川の洪水流・河床変動解析の一体解析法を常願寺川に適用し、現状河道における河岸際の深掘れ問題を示し、そこに巨石付き盛土砂州を用いた河岸防護工を施工した場合の効果を検討した。

(3) 河川構造物近傍では流れの鉛直構造が複雑になるため、構造物近傍の河床変動解析においては、三次元的な流れによる河床に作用する流体力（せん断応力と圧力）を適切に考慮する必要がある。本研究では、静水圧分布等の浅水流の仮定を用いずに底面流速と底面圧力を評価することができる一般底面流速解析法を開発した。一般底面流速解析法では、底面流速と底面圧力をそれぞれ渦度の定義式と鉛直方向運動方程式を水深積分した方程式で評価できることを見出している。これらの式を計算するために、一般底面流速

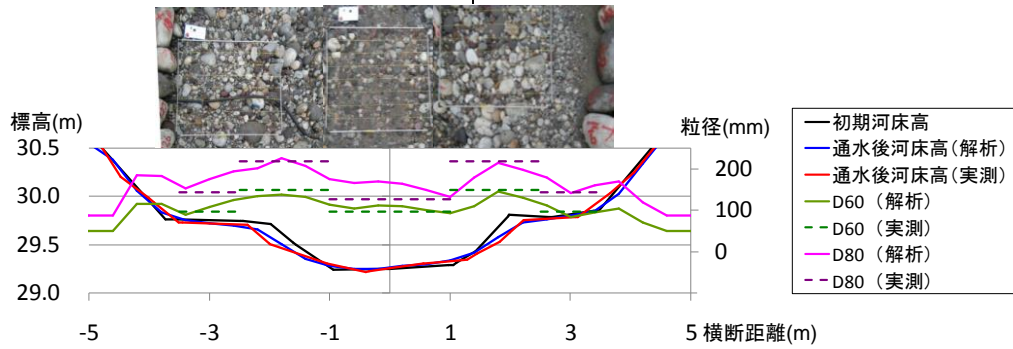


図-7 常願寺川現地実験結果と解析結果の比較

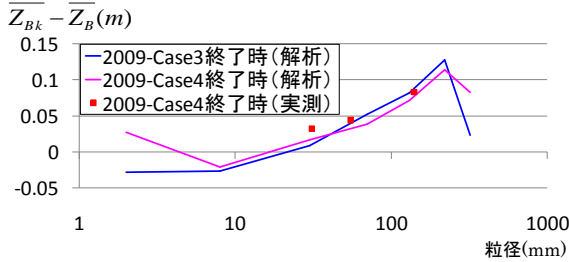


図-6 各粒径の平均高さの観測値と解析値の比較

解析法は図-5 に示す基礎方程式により構成されている。本研究では、この手法をこれまで解析することが困難であった複雑な流れの鉛直構造を有する実験に適用し、検証した。また、実河川に対する適用性を検証するため、常願寺川現地実験、浅川水衝部において局所流の計測法を開発するとともに、計測結果と解析結果を比較し、検討した。

#### 4. 研究成果

(1) 砂・砂礫河川において一般に用いられる現行の河床変動解析法を常願寺川河床変動実験結果に適用した結果、石礫河川では、限界掃流力、空隙率、交換層の設定の仕方が問題になり、石礫河川の河床変動の算定精度が低いことを示した。石礫河川の土砂移動・河床変動を定量的に扱うには、大きな石の存在とそれらが形成する大きな表層凹凸(空隙空間)を十分に考慮することが重要であることを示し、現地調査により得られた表層石礫の凹凸分布を考慮した石礫河川の二次元河床変動解析法を構築した。図-6 は断面における各粒径の平均高さの実測値と解析値の比較を示したものである。解析結果は大きな粒径ほど平均高さが高い傾向を説明できることが明らかとなった。図-7 は、常願寺川現地実験における河床横断形状および粒度分布の実測値と解析値の比較と各断面の河床表層写真である。解析結果は実測結果に見られる低水路河岸の洗掘、低水路中央部の土砂堆積を再現し、低水路および高水敷では粒径が細かく、侵食された低水路河岸で粒度が粗くなっていることをよく説明できている。この

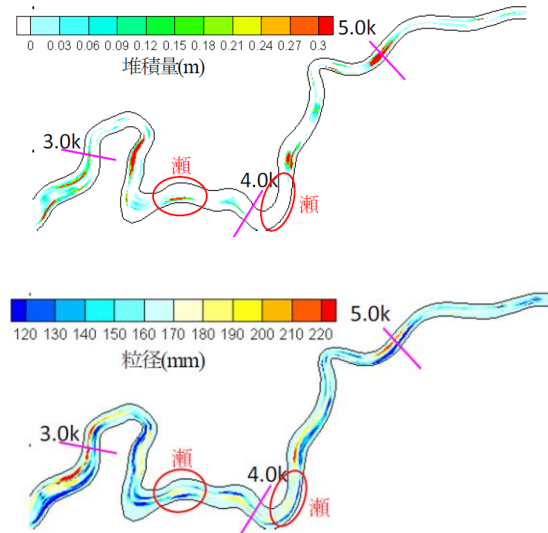


図-8 ダムから排出された白い石礫の堆積量分布(上)と平均粒径分布(下)  
(旭川の解析結果：平成15年)

ように、構築した解析法は石礫河川の河床変動の特徴の説明力が高いことが明らかとなった。

(2) 本研究では、旭ダム排砂バイパストンネルによる石礫排出機構と下流河道の瀬淵回復、粒度分布変化について、実測・調査データと開発した石礫河川の河床変動解析法を用いて検討を行った。図-8 は平成11年～平成15年までに排出された石礫の堆積量分布と平均粒径分布を示す。現地データ及び解析結果から、排砂バイパストンネルにおける石礫の排出過程を再現するとともに、粗粒化し、低下した下流河道では、上流から排出された多量の白い石礫の流下により、砂州の発達と、瀬・淵及び河床構成材料の回復過程等を明らかにした。次に、石礫河川における洗掘対策として、申請者らによって考案された巨石付き盛土砂州の設計法を確立するために、構築した石礫河川の洪水流・河床変動解析の一体解析法を常願寺川に適用し、検討した。図-9 に H9 年河道に H10 年洪水を流下させた場合の河床変動解析結果と実測値 (H14

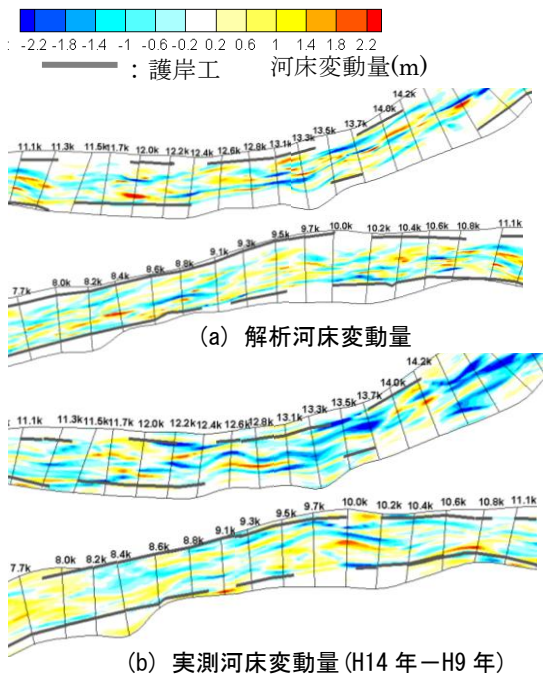


図-9 石礫河川の河床変動解析法による常願寺川における河床変動解析結果と実測結果の比較

年-H9年)との比較を示す。本解析法では、河岸侵食を捉えることは出来ていないが、13.5kの河岸侵食の前面の大きな深掘れなど常願寺川の河床変動を概ね説明できることが示された。この解析法と実測データを用い、急流河川で慣用的に使われてきた護岸および根継ぎ護岸設置による問題点を明らかにした、そして砂州を活用し、巨石を用いた自然性豊かな新しい河岸防護工(巨石付き盛土砂州)の有効性を現地実験、現地パイロット試験、及び解析結果から示し、急流河川における自然砂州を活かした治水と環境の調和した河道計画について検討した。

(3) 流れの鉛直構造を表現できる一般底面流速解析法を、構造物を越流する急変流、小規模河床波を有する流れ、橋脚周りの三次元流、複断面蛇行流路の流れと河床変動に適用し、検討した。図-10は複断面蛇行流路の河床変動の実験結果と解析結果の比較である。解析結果は低水路水深に対する高水敷の水深(相対水深 $Dr$ )が増加し、単断面的流れから複断面的流れとなることによって、洗掘部が低水路外岸側から内岸にシフトする現象をよく説明できることが分かった。これらの結果から、本解析法は流れの三次元構造を適切に評価でき、既往実験の流れや河床変動現象をよく説明することが明らかとなった。次にこの解析法の現地水衝部の三次元流についての適用性を検討するため、ADCPの個別のビームデータを解析する局所流計測法を開発した。この計測法を常願寺川現地実験、浅川水衝部に適用し、流速測定結果と解析結果

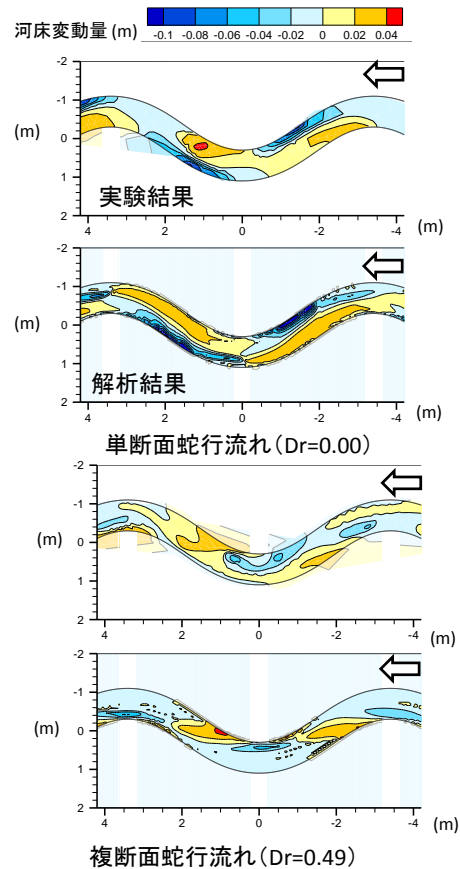


図-10 底面流速解析法による複断面蛇行流路の河床変動の解析結果と実験結果の比較

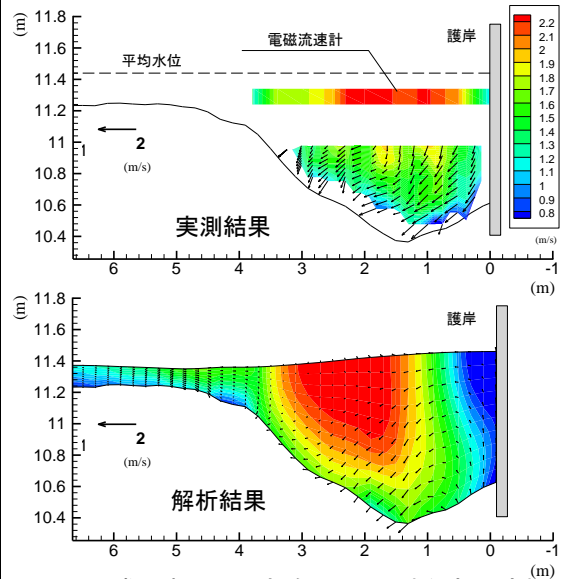


図-11 常願寺川現地実験における水衝部の流れの三次元構造の実測結果と解析結果の比較

を比較し、検討した。図-11は常願寺川現地実験における水衝部の二次流の計測値と解析値の比較である。二次流強度が実測結果に比べて弱く、壁面近傍まで高流速域が移動していないなど、課題はあるが、現地石礫河川の三次元流れの特徴を説明できることが分かった。

## 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 41 件)

- ① Shoji FUKUOKA, Tatsuhiko UCHIDA,  
TOWARD INTEGRATED MULTI-SCALE  
SIMULATIONS OF FLOW AND SEDIMENT  
TRANSPORT IN RIVERS, 査読有, Journal of  
Japan Society of Civil Engineers, Ser.  
B1, Vol. 69, No. 4, 2013, II\_1-II\_10.
- ② 長田健吾, 福田朝生, 山下克己,  
福岡捷二  
旭ダム排砂バイパストンネルによる石礫  
の排出機構および下流河道の瀬淵の回復,  
査読有, 土木学会論文集 B1, Vol. 69No. 4,  
2012, I\_1105-1110
- ③ 長田健吾, 福岡捷二  
石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹  
凸分布に着目した二次元河床変動解析法,  
査読有, 土木学会論文集 B1, Vol. 68No. 1,  
2012, 1-20
- ④ 内田龍彦, 福岡捷二  
底面流速解法による連続する水没水制群  
を有する流れと河床変動の解析, 土木学  
会論文集 B1, 査読有, Vol. 67 No. 1, 2011,  
16-29
- ⑤ 福岡捷二  
温暖化に対する河川の適応技術のあり方  
ー治水と環境の調和した多自然川づくり  
の普遍化に向けて, 土木学会論文集 F,  
査読有, Vol. 66 No. 4, 2010, 471-489

[学会発表] (計 26 件)

- ① 奥石大, 内田龍彦, 福岡捷二「現地スケ  
ールの水衝部における ADCP を用いた三  
次元流れの計測」土木学会第 67 回年次学  
術講演会, 2011 年 9 月 5 日, 名古屋大学.
- ② 前嶋達也, 曾山和宏, 長田健吾,  
福岡捷二「石礫蛇行河川の洪水流・河床  
変動解析法に関する研究」, 土木学会第  
66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月, 愛  
媛大学
- ③ 浅野文典, 曾山和宏, 内田龍彦,  
福岡捷二「河川における掃流砂の観測と  
流砂量評価技術に関する研究」, 土木学会  
第 66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月,  
愛媛大学
- ④ 前嶋達也, 岩佐将之, 長田健吾,  
福岡捷二「石礫複断面河道における流れ,  
縦横断面形状, 河床材料分布に及ぼす河  
道平面形状の影響」, 土木学会第 65 回年  
次学術講演会, 2010 年 9 月 2 日, 北海道  
大学

[その他]

ホームページ URL :

<http://c-faculty.chuo-u.ac.jp/~sfuku/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福岡捷二 (FUKUOKA SHOJI)  
中央大学・研究開発機構・機構教授  
研究者番号 : 30016472

### (2) 研究分担者

内田龍彦 (UCHIDA TATSUHIKO)  
中央大学・研究開発機構・機構准教授  
研究者番号 : 00379900

長田健吾 (OSADA KENGO)  
阿南工業高等専門学校・建設システム工学  
科・講師  
研究者番号 : 30439559