

石礫河川における河床変動，河床材料粒度分布の実験的及び解析的研究

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON BED VARIATION AND GRAIN SIZE DISTRIBUTION IN STONY-BED RIVERS

土木工学専攻 37号 前嶋 達也

Tatsuya MAESHIMA

1. 序論

石礫河川の河床構成材料は、300mmを超える巨石から2mm以下の砂まで非常に幅広く存在する。また、河床勾配が急であるため洪水時の流体力が大きく土砂移動が活発となり、中小規模の洪水でも河床変動及び河岸侵食が生じる。洪水時の河床変動は、流量規模、河道平面形状、河川構造物の影響に加えて河床構成材料が極めて重要となる。混合粒径を用いた河床変動に関する研究は数多く行われているが（例えば芦田ら¹⁾）、既往研究の多くは、室内実験水路で行われているため実験条件が限られ、特に使用できる河床材料の大きさや粒度分布に限界がある。福岡ら²⁾は、2004年から2008年にかけて常願寺川で現地河床材料を用いた大規模現地実験を行い、河床材料が大きい石礫河川における河床変動機構、河床材料分布特性を調べた。しかし、これらの実験水路は単断面河道であり、断面形状が単断面と複断面では洪水時の流れ場、その結果として生じる河床変動及び河床材料分布は異なる。本研究は、2009年に常願寺川砂州上で行った複断面直線 - 蛇行水路を用いた現地実験結果をもとに、複断面河道における河道縦横断面形状、河床材料分布特性に関して検討する。そして、既往の室内移動床実験との比較を行い、石礫河川の河床変動に対する現地実験の持つ重要性を示す。また、石礫河川の河床変動予測を目指して、底面流速解法を用いた準三次元洪水流解析³⁾と石礫河川の河床変動解析⁴⁾を組み合わせた解析モデルを構築し、2009年常願寺川現地実験に適用し検討した。

2. 2009年常願寺川大規模現地実験

(1) 実験概要

実験は、常願寺川8.6kmの砂州上に2つの直線区間とその間に2つの蛇行部を有する複断面直線 - 蛇行水路を掘削し通水した。図-1に実験水路平面図、図-2に掘削断面形状を示す。2つの蛇行部の蛇行度S（低水路蛇行長/低水路蛇行波長）は1.1である。1つ目の蛇行部(No.5～No.9)は、浸食性の自然河岸で形成されている。2つ目の蛇行部(No.10～No.13)は、外岸堤防河岸から低水路際(2.0m程度)にかけて、高さ0.5m、幅1.0m、奥行き1.0mの袋詰め玉石を複数積んで堤防河岸を保護した。その他の地点の低水路河岸は、流量規模に応じて断面形状が変形できる自然河岸である。また、堤防河岸の侵食による

大量の土砂供給を防ぐために、左右岸の堤防河岸際に、約400mm～700mmの玉石を連続的に配置した。

実験は、異なる規模の定常流を4回通水した。表-1に実験条件、写真-1, 2にCase3, Case4の実験状況を示す。最大流量のCase4は常願寺川の平均年最大流量を単位幅換算した流量(2.6 m²/s)の6割程度に相当する。通水時間は、河床が動的に安定するまでの十分な時間とした。測定項目は、水位(水圧式水位計, レベル測量), 流量, 河床縦横断面形状, 河床材料の時空間変化である。河床材料は、表層画像解析とふるい分け試験(Case4終了後)により行った。図-1に観測地点を示す。

(2) 実験結果

図-3はNo.4(直線区間), No.7(蛇行区間)断面における通水後の河床横断面形状とCase3終了後の河床表層

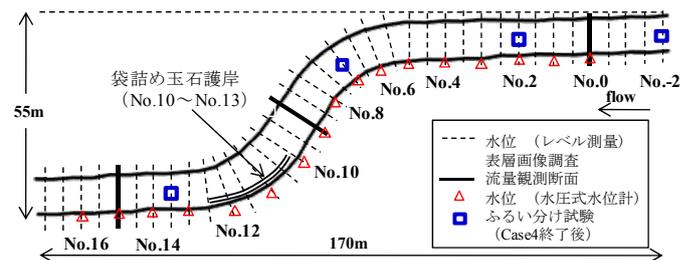


図-1 実験水路平面図

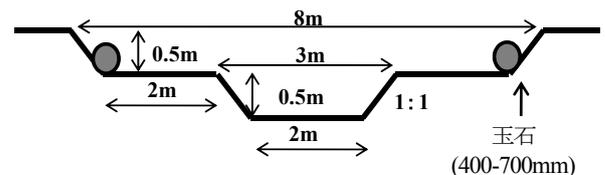


図-2 掘削水路断面図

表-1 実験条件

実験CASE	Case1	Case2	Case3	Case4
流量 (m ³ /s)	2.0	3.2	8.0	12.0
通水時間	1時間40分	50分	2時間30分	2時間30分
低水路水深(m)	0.34	0.56	0.80	1.10
高水敷水深(m)		0.17	0.41	0.69
水面幅(m)	3.1	6.9	7.8	8.5
平均河床勾配	1/130		1/150	



写真-1 Case3中の流況



写真-2 Case4中の流況

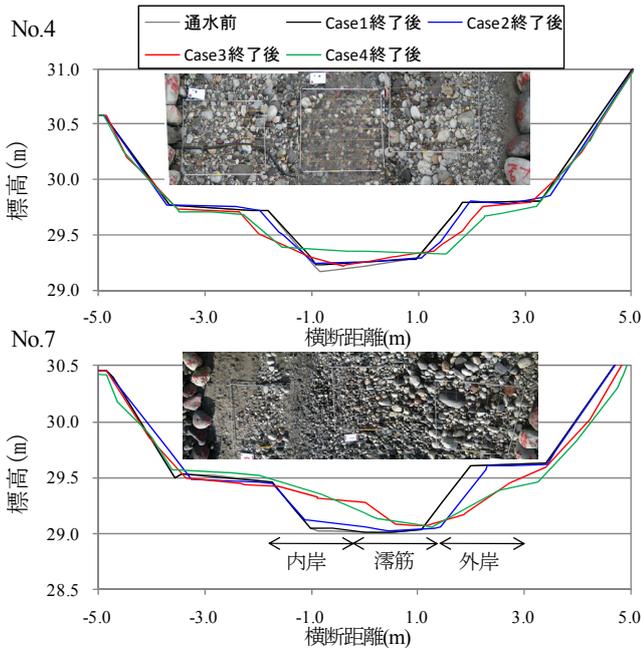


図-3 河床横断面図

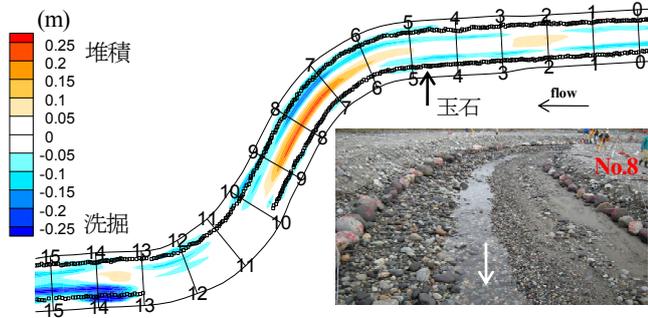


図-5 Case3 前後の河床変動量コンター

写真, 図-4 に同断面の河床材料粒度分布を示す。低水路満杯流量規模の Case2 では, 若干の洗掘や堆積は生じるが直線部, 蛇行部ともに断面形状は複断面形状を維持している。Case3 では, 相対水深 Dr (高水敷水深/低水路水深) が 0.4 を超え, 図-5 に示すように通水前後で河床変動が縦断的に顕著に生じた。Case3 終了後の上流直線区間は, 低水路河岸及び高水敷河床が侵食され, 断面形状は左右対称に近い船底形断面⁵⁾になっている。侵食を受けた低水路河岸の粒径は低水路河床材料よりも粗くなり, これが低水路を安定させる機構であることが分かる。蛇行頂部に位置する No.7 断面は, 遠心力に起因する二次流が発達し, 外岸河床の洗掘, 低水路内岸の堆積が顕著に生じ, 初期の複断面形状から滑らかな横断河床勾配をもつ船底形断面形状に変化した。また, 高水敷河床が侵食されて大きな石礫が低水路に供給されるため, 流量が増大しても河床洗掘が進行するのではなく, むしろ河床高は上昇している。Case3 終了後の平均粒径は, 侵食された外岸で約 200mm, 滞筋で約 90mm, 内岸で 50mm となり, 写真に示すように横断面内で河床材料の顕著な分級が生じている。Case4 では大流量を通水したにもかかわらず, 直線部, 蛇行部における河岸侵食及び河床洗掘に

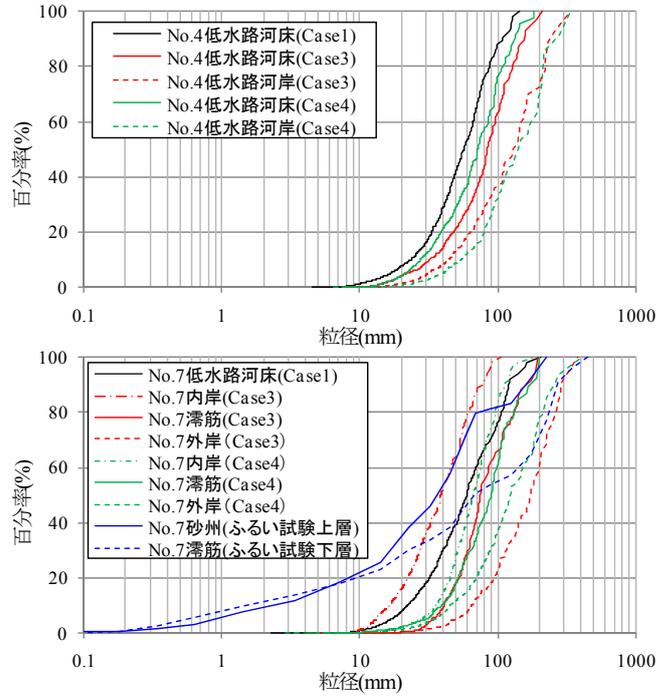


図-4 河床材料粒度分布

よる断面形状の変化は小さい。これは, Case3 で安定な断面形状と河床材料分布が形成されたことにより, 大きな流量に対して抵抗力を持つためである。しかし, 水位上昇によって玉石背後の堤防河岸が侵食され砂礫が流出した(写真-2)。No.4 断面ではそれら砂礫が低水路河床に堆積しており, 低水路の河床材料は Case3 に比べて小さくなった。蛇行部では流量増加により二次流が強くなるため, 蛇行部内岸の堆積は左岸高水敷まで達している。堆積した内岸の平均粒径は約 70mm であり, Case3 に比較して顕著に粗くなった。断面形状の変化は少ないが 70mm 程度の石が実験中に活発に移動していたことを示している。また, 河床表層の石礫は, 同じ方向を向いて重なって堆積する覆瓦構造となり, 石同士が互いに良くかみ合って安定している。大きな石礫は, 流れに対する抵抗力となり, 断面形状及び河床材料分布特性に重要な役割を果たすことを示している。

3. 芦田ら¹⁾の室内蛇行水路実験と現地実験の比較

芦田らは, 水路長 10m, 水路幅 0.2m の側壁が固定された蛇行水路において一様粒径と混合粒径を用いた移動床実験を行った。図-6 に芦田らが実験で用いた粒度分布と常願寺川実験砂州上の粒度分布(ふるい分け試験)を示す。外岸域では河床洗掘, 内岸域では土砂堆積が生じ, 河床材料は外岸で中央粒径 $D_m=3.0\sim 3.8\text{mm}$, 標準偏差 $\sigma=3.5$, 内岸は $D_m=0.9\sim 1.1\text{mm}$, $\sigma=2.0$ となった。常願寺川実験 (Case4 終了後) の蛇行部外岸の河床材料は $D_m=130\text{mm}$, $\sigma=6.6$, 内岸は $D_m=40\text{mm}$, $\sigma=4.4$ であり, どちらの実験も標準偏差は, 粗粒化する外岸で大きくなり, 堆積する内岸で小さくなった。粗粒化した外岸域における平均粒径の初期粒度分布からの変化は, どちらの実験

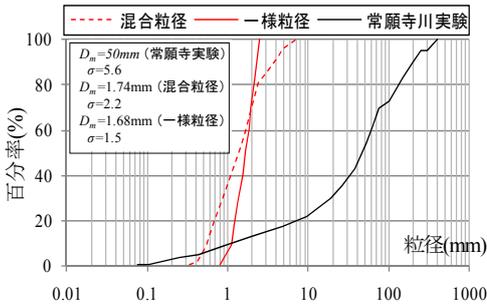


図-6 室内実験と常願寺川の河床材料粒度分布

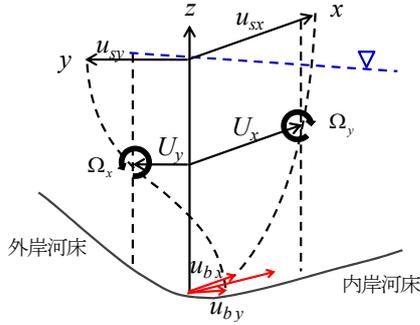


図-7 渦度を用いた底面流速解法

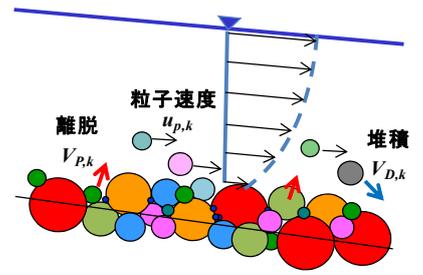


図-8 石礫河川の河床変動解析法

も約 2 倍、内岸と外岸の横断方向の平均粒径の差は約 3 ~ 4 倍であり、変化の程度はそれほど異ならないように見える。しかし、平均粒径の変化率及び標準偏差がほぼ同じ値を示しているにもかかわらず、河床材料が大きい石礫と河床材料が小さい砂礫ではそれらの持つ意味は異なる。それは、**図-6** が示すように室内水路実験と常願寺川実験の河床材料は、中央粒径は約 20~50 倍、標準偏差は約 2~3 倍異なっており、現地石礫河川の河床材料は著しく広い粒度分布で構成されているからである。砂河川・砂礫河川は、粒度分布がある程度の広がりを持つていても、河床材料の粒径が小さいため河床表層の凹凸(空隙)は小さく、時空間的に河床凹凸は大きく変わらない。一方、石礫河川は、初めは細かい材料で河床表層は覆われているが洪水の作用により大きな石礫が河床表層に露出するため、河床凹凸(空隙)が時空間的に大きく変化し、砂礫河川に比べて極めて大きくなる。河床表層の凹凸は、土砂の移動・堆積及び流れ場に影響を及ぼし、結果として河道断面形状を支配する要因となる。加えて、石礫河床では、はまり石状の石が多くみられること、石礫の形状が様々であるため石礫が互いに噛み合い容易に移動することができなくなる。河床材料の粒径及び河床材料粒度分布は、流砂・河床変動現象を支配する極めて重要な要素であり、河床材料が大きい石礫河川の河床変動に関しては現地での検討が重要であることを示している。

4. 底面流速解法を用いた石礫河川の河床変動解析

(1) 解析手法, 解析条件

河床変動が顕著に生じた Case3 実験を対象に河床変動解析を行う。実験水路は大きく蛇行しており、土砂移動は二次流の影響を強く受けるため流れの計算は、平面二次元解析では精度をあげた説明はできないと考えられる。また、石礫河川の土砂移動は、砂礫河川とは異なることから、従来の粒径別限界掃流力を用いる流砂量式と河床材料の空隙率を一定とする河床の連続式を用いた解法では再現することができない⁴⁾。本研究では、内田・福岡³⁾の底面流速解法を用いた準三次元洪水解析と長田・福岡⁴⁾の石礫河川の二次元河床変動解析を組み合わせた解析モデルを構築する。流れの基礎式は、一般座標系

(ξ, η) の浅水流方程式と連続式、水表面流速の運動方程式、水深積分渦度方程式を用いる。渦度を用いた底面流速解法を**図-7**に示す。流速鉛直分布は 3 次多項式で仮定している。底面流速は、水深積分した渦度と水表面流速を用いて(1)式から求める。

$$u_{bx} = u_{sx} - \Omega_y h, \quad u_{by} = u_{sy} + \Omega_x h \quad (1)$$

ここに、 u_{bx}, u_{by} : x, y 方向の底面流速, u_{sx}, u_{sy} : x, y 方向の水表面流速, Ω_x, Ω_y : x, y 方向の水深平均渦度, h : 水深を表している。

河床変動計算は、上述の解析法により求めた底面流速を用いて**図-8**に示すように各粒径 k に働く力を考え、河床からの離脱量 $V_{p,k}$ 、堆積量 $V_{D,k}$ 及び粒子速度 $u_{p,k}, u_{p,k}$ を計算する。石礫河川の河床変動で重要となる河床凹凸は、河床からの離脱量と堆積量を用いて、(2)式に示す各粒径の高さ Z_{Bk} を時々刻々計算することで表現している。流砂量 $q_{bx,k}, q_{by,k}$ は、(3)式に示す単位面積当たりの流砂体積 $V_{s,k}$ と粒子速度を用いて(4)式より求める。

$$\frac{\partial Z_{B,i,j,k}}{\partial t} = -\frac{\alpha_2 (V_{P,i,j,k} - V_{D,i,j,k})}{\alpha_3 P_{i,j,k}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_{S,i,j,k}}{\partial t} + \frac{\partial q_{B\xi,j,k}}{\partial \xi} + \frac{\partial q_{B\eta,i,j,k}}{\partial \eta} = V_{P,i,j,k} - V_{D,i,j,k} \quad (3)$$

$$q_{B\xi,i,j,k} = u_{p\xi,i,j,k} V_{S,i,j,k}, \quad q_{B\eta,i,j,k} = u_{p\eta,i,j,k} V_{S,i,j,k} \quad (4)$$

ここに、 i, j : メッシュ番号, α_2, α_3 : 粒子の形状係数 ($\pi/4, \pi/6$), P_k : 各粒径の表層割合である。

解析で用いた粒度分布は**図-4**に示した実測の粒度分布を参考に表層と表層下に分けて与えた。上下流の境界条件は、観測された水位ハイドログラフを用いた。実験では、水路上流端からの土砂供給はなく、解析でも考慮していない。

(2) 解析結果

図-9は約 2 時間後の解析水位と観測水位(レベル測量)の縦断面図を示す。解析値は蛇行部を含めて観測水面形を概ね再現している。**図-10**は No.9 断面で観測された流速の横断分布と解析値の比較を示している。No.9 は二つの蛇行部の変曲点に位置し、上流蛇行部で加速された速い流れが流入してくるため右岸側の流速が速い。解析流速

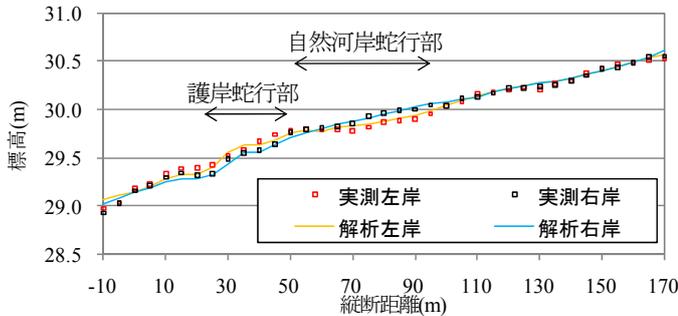


図-9 解析・実測の水位縦断面図

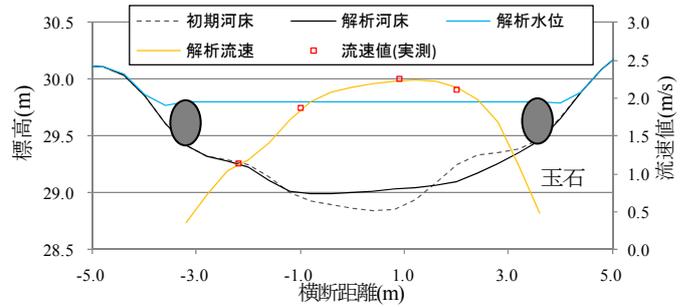


図-10 解析流速分布 (No. 9 断面)

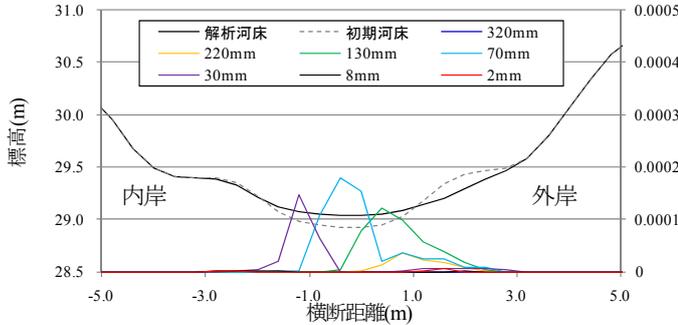


図-11 粒径別単位幅流砂量 (No. 8 断面)

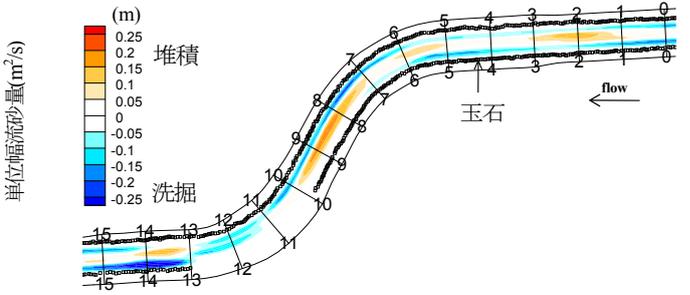


図-12 解析河床変動量コンター

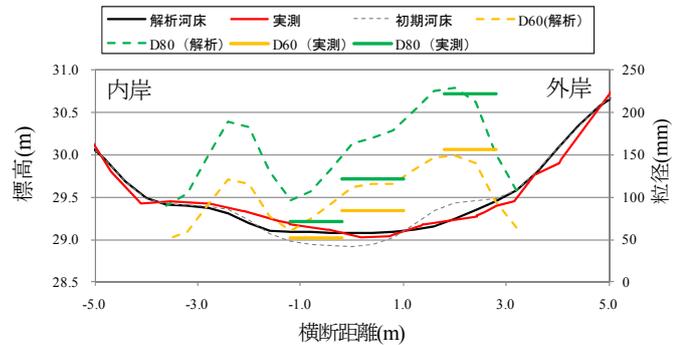


図-13 横断形状と平均粒径の横断分布 (No. 8 断面)

は、概ね分布形状を再現している。図-11は通水開始50分後のNo.8断面における粒径毎の単位幅流砂量分布を示している。河床中央で130mm、70mm、30mmの石礫が主力として移動していることが分かる。外岸側では、侵食により河床材料が粗粒化して安定するため、石礫の移動はあまり見られない。図-12に解析河床変動量コンター、図-13にNo.8断面の解析横断面形状とD₆₀、D₈₀粒径の横断分布を示す。D₈₀は80%粒径を示している。実測の水面形、流速分布を概ね再現できているため、直線部の低水路河岸侵食、蛇行部外岸河床の侵食、蛇行部内岸の土砂堆積は、図-5に示した実測コンターの傾向を捉えている。石礫河川で重要となる河床表層の河床材料は、濡筋河床、外岸河床の粒度分布を概ね再現しており河床材料の分級が生じている。しかし、蛇行部内岸における細粒土砂の堆積を十分に再現できていないため、実験水路で現れた河床材料の顕著な分級は十分には再現できていない。石礫河川は、大きな石礫が河床安定・土砂移動に重要であり、それら石礫の移動機構は本解析モデルにより再現することができた。

5. 結論

本研究の結論を以下に示す。

- (1)石礫複断面蛇行河川は、低水路河岸及び高水敷河床が洗掘され初期の複断面形状から流れの状況に見合った船底形断面を形成する。洗掘及び侵食により現れる大きな石が河床安定及び土砂の移動・堆積に支配的な要因となることが実験より明らかとなった。そのため、石礫河川の河床変動は現地河川における検討が重要であることを示した。
- (2)渦度方程式を用いた底面流速解法と石礫河川の二次元河床変動解析法を組み合わせたモデルを構築し現地実験に適用した。本解析法により、複断面蛇行河道の水位、流速、河床変動及び粒度分布特性を再現できることを示した。

参考文献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義, 梅本正樹: 蛇行流路におけるSorting現象および平衡河床形状に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第33号 B-2, pp.261-279, 1990.
- 2) 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, pp.643-648, 2008.
- 3) 内田龍彦, 福岡捷二: 水平方向渦度方程式を用いた底面流速の半直接解法と橋脚周りの局所洗掘解析, 水工学論文集, 第54巻, pp841-846, 2010.
- 4) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の二次元河床変動解析法に関する研究, 河川技術論文集, 第15巻, pp327-332, 2009.
- 5) 福岡捷二: これからの河川管理を考えるー自然河川に学ぶ, 河川 66巻, 第3号, pp.3-9, 2010.