

嘉瀬川石井樋における 流れと土砂輸送の特性について

大串 浩一郎¹・谷 陽介²

¹正会員 佐賀大学大学院教授 工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

E-mail: ohgushik@cc.saga-u.ac.jp

²正会員 日乃出水道機器株式会社 (〒812-8636 福岡市博多区堅粕5-8-18)

佐賀県を流れる嘉瀬川の石井樋は、本川から分水し多布施川を通じて佐賀城下に導水するために17世紀初頭に作られた水利施設である。石井樋は、嘉瀬川上流から運ばれてくる土砂をできるだけ取り除く工夫がなされ、約400年間、佐賀の町へ農業用水や水道用水を供給し続けた。石井樋は歴史的・文化的価値が高い土木遺産であるが、石井樋の重要な機能の一つである、きれいな水を多布施川に流す機能については定量的な評価を行った事例がほとんどない。

本研究では、流れの数値解析を行うことにより、嘉瀬川石井樋における流れと土砂輸送特性についての検討を行い、石井樋の定量的な機能評価を行った。

Key Words : Kase River, Ishiibi, Numerical simulation, sediment transport, water diversion

1. はじめに

脊振山の西方を源とする嘉瀬川は、嘉瀬川水系の本川であり、佐賀平野を南流し、有明海に流れ込む。流域面積368km²、幹線流路延長57km、流域内人口は13万人の一級河川である。上流山地は大部分が花崗岩であることから、洪水時には土砂の流出が多く、また佐賀城下では頻繁に干ばつの被害を受けてきた。この被害を抑えるために、1623年頃に肥前佐賀藩士の成富兵庫茂安によってつくられたのが石井樋である。石井樋は、嘉瀬川14km地点に位置し、洪水被害を抑え、農業用水や水道用水を多布施川へ分流させた¹⁾。その後、約350年間役割を果たし続けた石井樋は、1960年に川上頭首工(図-1)の完成によって取水施設としての役割を終え、1963年に洪水で流出し砂に埋もれた。しかし、1994年に皇太子ご成婚記念事業として、約10年かけて2004年に復元された。復元された石井樋は、土木遺産にも登録されており、歴史的・文化的な価値が高い土木遺産であるが、復元後の石井樋に関する研究は少ない。また、石井樋の重要な機能である、きれいな水を多布施川に流すための土砂輸送についての定量的な評価が行われた事例が少ない。

本研究では、1次元流れ解析を行うことによって、出水の有無による比較を行い、土砂輸送の特性の把握を試みた。

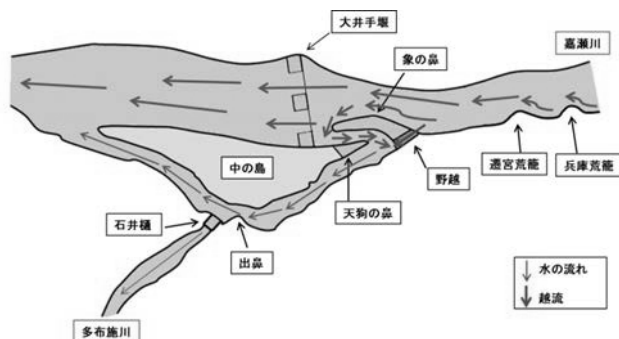


図-1 本研究の解析対象区間

2. 石井樋システムの概要

石井樋は川から水を取り入れる施設である井樋を石で作ったものであるが、天狗の鼻、象の鼻、大井手堰、出鼻、野越、兵庫荒籠、遷宮荒籠などが設置されており、これらの施設全体を総称して石井樋と呼んでいる。石井樋管理の基本的考え方としては、洪水時に土砂流出が多く、その土砂対策に工夫が要る。嘉瀬川の大井手堰で堰とめられた流れの一部を「天狗の鼻」と「象の鼻」と呼

ばれる水制工の間を逆流・迂回させ、その間に土砂を沈殿させることで、多布施川に砂が流入するのを防いでいる。また洪水時には、逆流・迂回してきた流れに、象の鼻の根元の野越から越流してきた流れをぶつけることで、流速を緩め土砂を沈めている²⁾。図－2に越流時の流れの様子を、写真－1、2に石井樋付近の写真を示す。



図－2 嘉瀬川石井樋の概略図



写真－1 石井樋の象の鼻と天狗の鼻



写真－2 石井樋の取水口

3. 嘉瀬川石井樋における流れの1次元数値解析

(1) 数値解析の条件と用いたデータ

本研究における解析対象区間を図－1に示す。嘉瀬川は6.4～16.6kmまで、嘉瀬川14km地点で分流する多布施川は0～3kmまで、嘉瀬川8.6km地点で合流する祇園川は0～6.2kmまでを解析対象区間とした。解析期間は2012年6月～7月とし、嘉瀬川の流況について解析を行った。この期間内の7月13日の総雨量は372.0mm、佐賀市で時間雨量91.0mm(観測史上2位)を記録し、池森観測所では最大流量375.27m³/s(正常流量2.5m³/s)、最大水位7.19mに達した⁴⁾。

1次元流れ解析には、DHIのMIKE11を使用した。流れ解析の基礎式として、連続の式および非定常運動量保存の方程式を用いた³⁾。

河道の再現のため、ブランチ・ノード(図－3)の作成およびノードへの断面の関連付けを行った。解析の際に用いた断面として、表－1のような区間で200m毎の横断測量データを使用した。

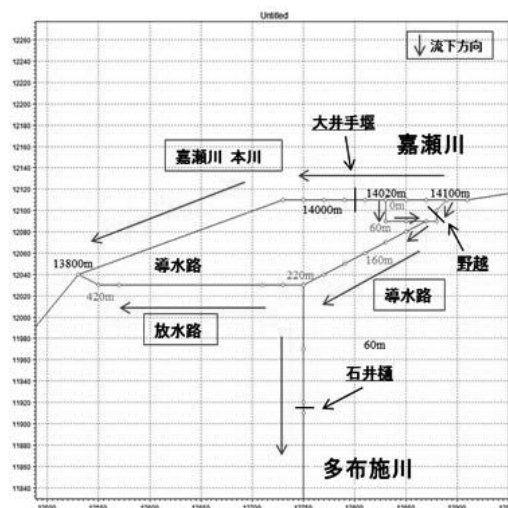
表－1 使用した各河川の横断測量データの区間

河川名	下流端	上流端	測量年
嘉瀬川	6.4km	16.6km	2012
多布施川	0.0km	3.0km	2012
祇園川	0.0km	6.2km	2003

象の鼻からの越流した流れの再現のため、野越を堰とみなし、嘉瀬川本川から導水路へブランチをつなげた(図－3)。越流する流れは本間の式を適用し流量係数を1.55に設定した³⁾。

また、大井手堰、石井樋の再現のため、九州地方整備局武雄河川事務所提供の石井樋付近の計画平面図、縦断面図の図面から実測値を与えて堰と樋門の設定を行った。

境界条件には、上流端に川上・祇園観測所の実測流量、下流端に徳万・植木観測所の実測水位をそれぞれ与えた(図－4、図－5)。



図－3 石井樋付近のブランチとノードの設定

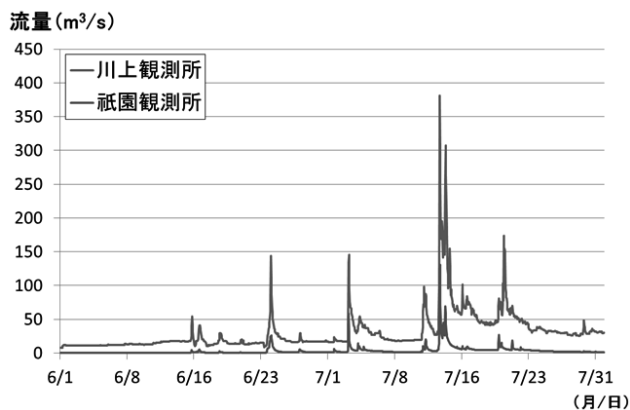


図-4 流量ハイドログラフ (境界条件)

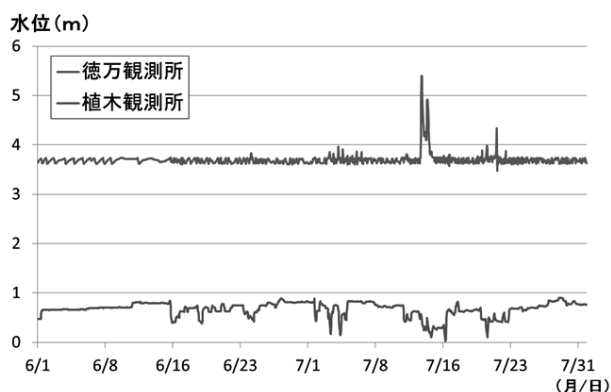


図-5 水位ハイドログラフ (境界条件)

流れ解析におけるマンニングの粗度係数については、河道の状況を参考にし、嘉瀬川で0.032、多布施川で0.03、祇園川で0.03とした⁶⁾。

(2) 解析結果と考察

図-6、7に池森観測所地点における水位の計算値と実測値の比較を示す。出水時は平水時より誤差が大きかった。高水敷の植生を反映させた粗度の評価が不十分であったのではないかと考えられる。しかし、精度の評価方法としてNash-Sutcliffe Efficiency (NSE) を用いた結果、0.96と概ね再現できたと考えられる⁵⁾。

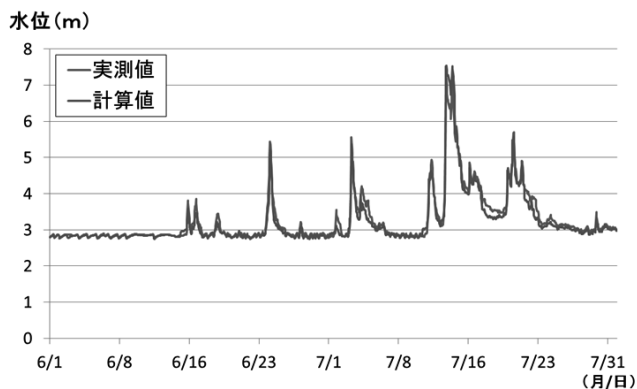


図-6 池森観測所における水位変動の計算値と実測値の比較

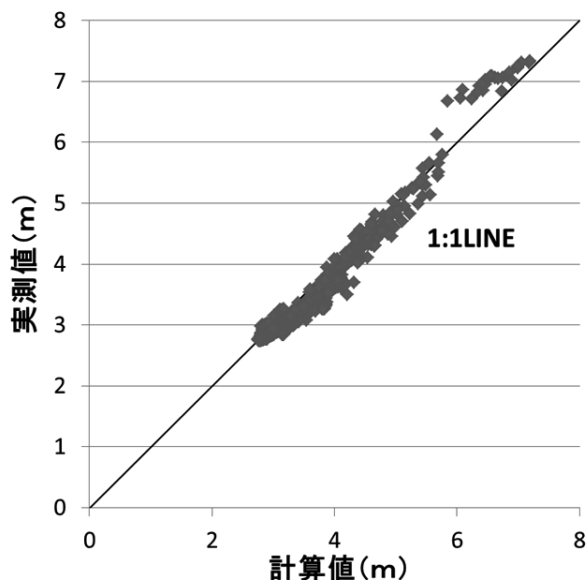


図-7 池森観測所における水位の計算値と実測値の散布図

図-8、9に出水時と平水時の嘉瀬川本川ならびに石井樋導水路・放水路における流速分布を示す。また、図-10、11にそれぞれ平水時と出水時の石井樋における流速分布を示す。

嘉瀬川本川において平水時は、大井手堰により14,020m地点の流速は0.058m/sであり、そこで土砂を沈め

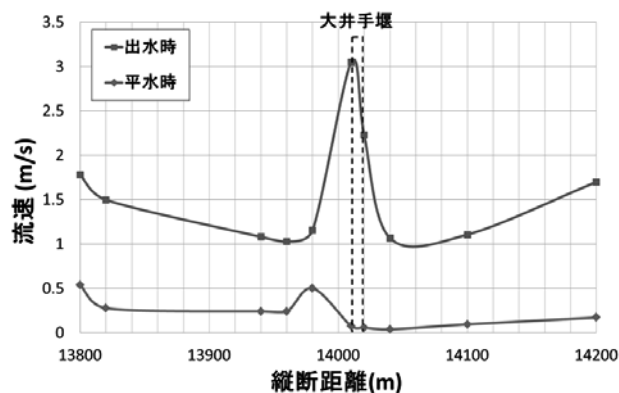


図-8 嘉瀬川本川における流速の縦断分布

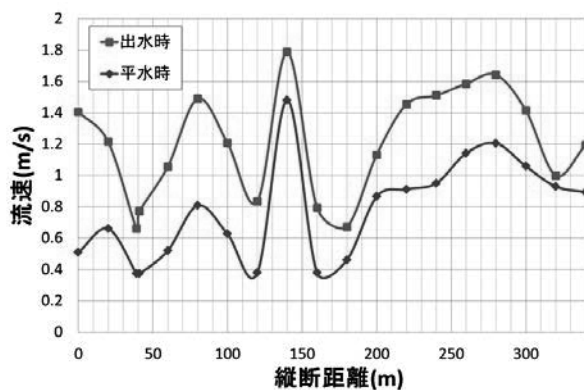


図-9 石井樋導水路・放水路における流速の縦断分布

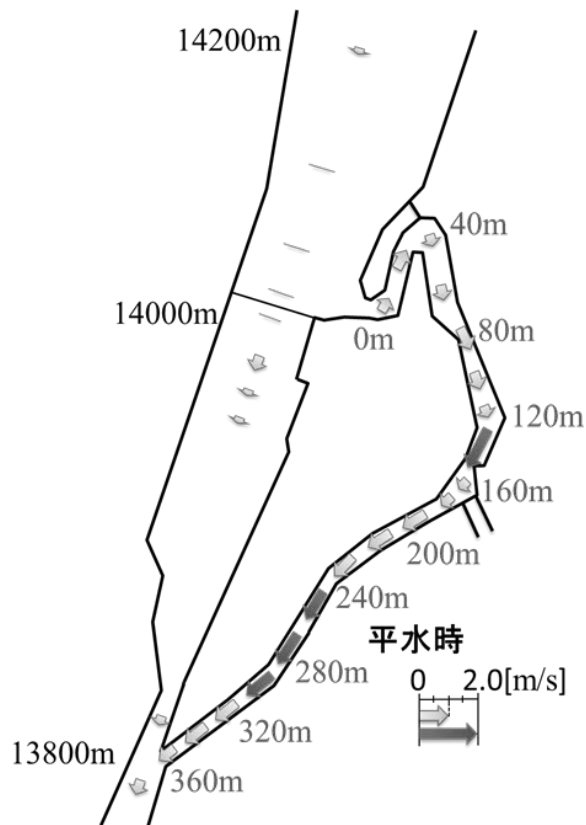


図-10 石井樋における平水時の流速分布

て、導水路に土砂濃度の小さい水を送り込んでいと考えられる。堰越流後の13,980～13,820m区間で平均流速が0.246m/sと増加した。出水時は堰の開放により、堰付近の流速が14,020m地点で2.227m/s、14,010m地点で3.048m/sと平水時と比較して大幅に増加した。この速い流れにより、平水時に大井手堰直前で堆積した土砂を下流へ押し流していると考えられる。

石井樋導水路・放水路の40m、120m、160m地点では、出水の有無に関わらず流速が遅くなった。この地点では川幅が広く、流速が減少するため土砂が堆積しやすい。40m地点は野越からの越流水との合流地点であり、流速の増加を避けるために川幅を広くしていると考えられる。また、出水時の160m地点も同様に流速が遅く土砂が堆積しやすい。この地点は多布施川への分流地点でもあり、流速を緩めることによって土砂を沈降させ多布施川へ清澄な水を流していると推測される。80m及び140m地点では特に流速が速くなった。この2つの地点は、天狗の鼻付け根部分の荒籠と樋門直前の出鼻によって川幅が狭められているため流速が速くなっている。さらに下流の放水路では川幅が約5mであり、導水路と比較すると狭く、出水時には平水時と比べて流速も速く、平水時に堆積した土砂を洗い流す効果があると考えられる。

図-10より、平水時においては、大井手堰付近（14.1km - 14.0km）で摩擦速度が減少し、導水路へ向かう途中で一度上昇しているが、導水路を迂回後に再び減少しており、断面幅が広がることによって土砂を沈め

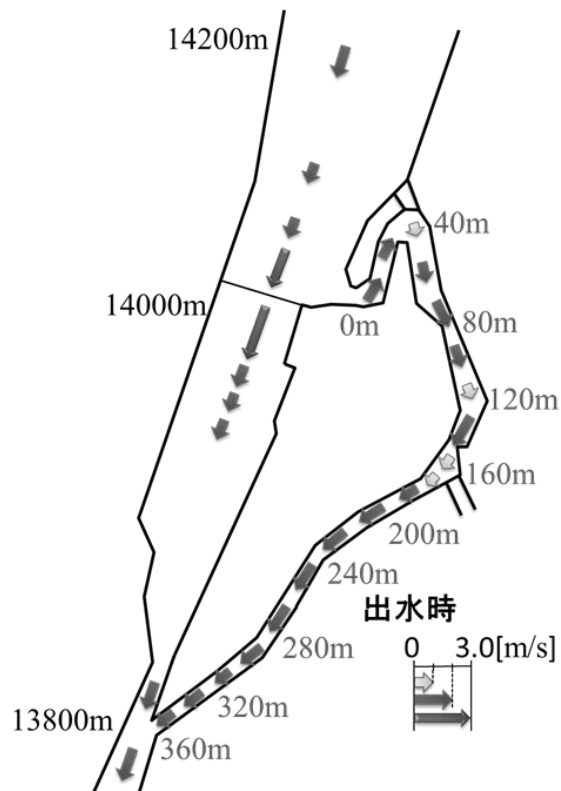


図-11 石井樋における出水時の流速分布

ていると考えられる。放水路では、一定の摩擦速度を保ちつつ、嘉瀬川本川へと放流している。

出水時には、象の鼻の野越からの越流が起きており、導水路を迂回後に摩擦速度が上昇している。これは、越流した流量と迂回した流量が合流することによって摩擦速度が上昇し、土砂を輸送していると考えられる。また、図-8より多布施川分流地点（220m）で一度、摩擦速度が減少している。これは220m地点における断面が分流のために広がっているためと考えられる。

4. 石井樋付近の流れの摩擦速度・限界掃流力

1次元流れ解析から得られた流速、径深、水位から、石井樋付近の出水の有無における摩擦速度・無次元限界掃流力を求めた。平水時は2012年6月6日15時（池森観測所において正常流量2.5m³/s時）、出水時は2012年7月13日15時（池森観測所において年最大流量452.07m³/s時）とした。

河床上をある水深で水が流れると、河床の潤辺にはせん断応力 τ_0 が水塊に対して流れと逆方向に働き、一方、流れは潤辺に対して流れと同方向に τ_0 の応力を及ぼす。したがって、河床が非粘着性の砂礫で構成されている場合には、この力は砂礫粒子を下流へ押し流そうとするので、この τ_0 を掃流力（河床せん断力）と呼んでいる⁷⁾。

掃流力 τ_0 を流速の次元で定義したものを摩擦速度と

いい、速い流れが土砂にぶつかって発生することによって土砂が移動することを表す指標と考えられる。

摩擦速度 u_* は、次式で表される。

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} = \sqrt{gRI_e}$$

ただし、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 R は径深、 I_e はエネルギー勾配である。

ある粒子が河床上にあるとき、河床における掃流力 τ_0 あるいは摩擦速度 u_* が限界値を超えると粒子は移動を開始する。この限界値をおおのの限界掃流力 τ_c あるいは限界摩擦速度 u_{*c} という。限界摩擦速度を算出する方法は、古くから多くの研究者により実験的、理論的に研究が進められてきたが、現一様粒径砂礫の限界掃流力の算定式としては、岩垣の式⁹⁾が最もよいとされている。本研究では、嘉瀬川の石井樋付近における代表粒径 $d_{60} = 14.516\text{mm}$ を用いて限界摩擦速度 $u_{*c} = 12.398\text{cm/s}$ を求めた。また、無次元限界摩擦速度は次式で与えられる。

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd}$$

ここに、 $s = (\rho_s - \rho) / \rho$: 砂粒の水中比重、 d : 砂の粒径である。

図-12に嘉瀬川本川、図-13に石井樋導水路・放水路における出水時と平水時の摩擦速度の縦断分布を示す。粒径毎の河床材料に対する限界摩擦速度を破線で示しており、この破線を越えた場合は、対応する河床材料が移動する。

嘉瀬川本川において平水時は、大井手堰直前の摩擦速度が 0.67 cm/s であり、嘉瀬川における代表粒径の河床材料の移動はない。しかし出水時には堰が開放されることで、摩擦速度が 18.58cm/s と大幅に増加し、平水時に堆積した土砂を流すこととなる。

一方、石井樋導水路においては出水時・平水時ともに 80m 、 140m 地点は他の地点より摩擦速度が大きい。これらの地点は荒籠と出鼻によって川幅を狭めることで流速を増加させ、土砂を押し流していると考えられる。また上記地点の下流側に川幅の広い地点を設けることで、土砂を堆積させていると思われる。石井樋放水路（ 140m 地点の下流）においては、多布施川への分流地点があるため、できるだけ土砂の少ない水を樋門に送り込む仕組みであると推測できる。

導水路には摩擦速度を緩めて、土砂を沈めていると考えられる地点が3ヶ所あるが、放水路では比較的一定の摩擦速度を保ち、代表粒径の河床材料も含めて最大で中礫の河床材料が移動しており、導水路、放水路に堆積した土砂を出水時に嘉瀬川本川に戻していると考えられる。

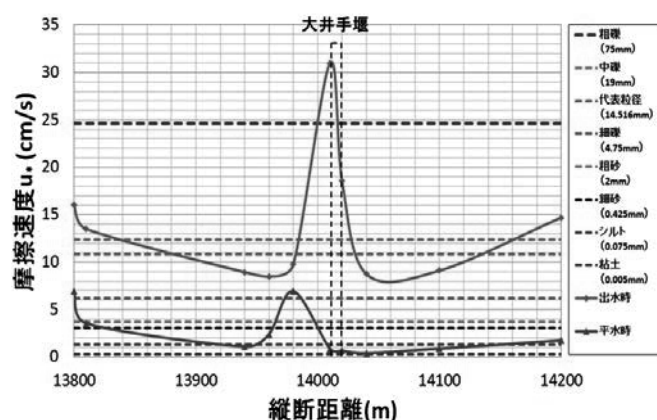


図-12 嘉瀬川本川における出水時と平水時の摩擦速度の縦断分布

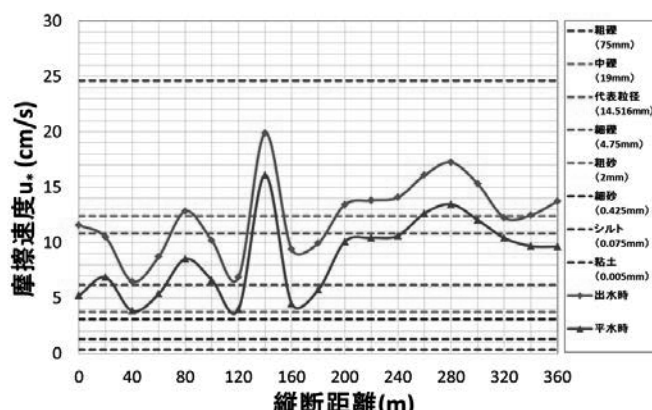


図-13 石井樋導水路・放水路における出水時と平水時の摩擦速度の縦断分布

また、無次元限界掃流力については、代表粒径 14.516mm の限界摩擦速度より計算した結果、 0.05 となった。石井樋導水路・放水路における無次元掃流力の縦断分布を出水時と平水時について図-14に示す。なお、図中には石井樋導水路・放水路における限界無次元掃流力も示している。この値を超過した区間で河床材料は洗掘され下流へ流されることになる。

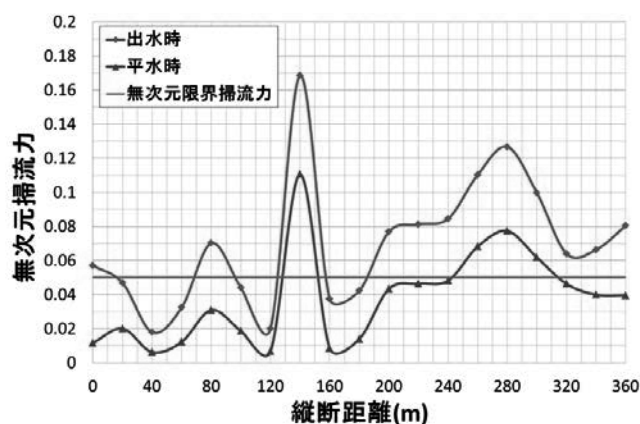


図-14 石井樋導水路・放水路における出水時と平水時の無次元掃流力の縦断分布

5. 石井樋の土砂輸送特性に関するまとめ

(1) 嘉瀬川本川

平水時は、大井手堰によって水勢を和らげることによって、流速は堰直前で0.058m/s、摩擦速度は0.667cm/sとなり、土砂を堆積させていると考えられる。このことにより土砂の少ない水を石井樋導水路へ導く役割を果たしていると推測される。また、出水時に堰を開放することにより、流速は最大で3.048m/s、摩擦速度は粗礫(75mm)の限界摩擦速度を超える25.884cm/sと非常に速くなっており、平水時に堰直前に堆積した土砂を一気に流すと考えられる。

(2) 石井樋導水路

導水路(0~160m)の川幅は大きく変化し、80m地点の荒籠と140m地点の出鼻の2カ所に狭窄部がある。荒籠は天狗の鼻を迂回して南にやや下った位置にあり、川幅は約8mと狭く、その地点の流速は平水時で0.808m/s、出水時で1.490m/s、摩擦速度は平水時で8.523cm/s、出水時で12.833cm/sとなっており、他の地点と比較して流れが速くなっている。また、摩擦速度の計算結果より出水時では中礫(19mm)以下の河床材料が移動していることが分かった。石井樋の直上流に位置する出鼻も同様に、川幅は約7mと狭く、流速は平水時で1.481m/s、出水時で1.787m/s、摩擦速度は平水時で5.422cm/s、出水時で17.911cm/sとなっており、導水路における他の地点と比較して最大である。その結果、平水時・出水時ともに中礫(19mm)以下の河床材料が移動する。この2地点は、流路を狭めて流速を速め土砂を押し流す効果を与えている。また、出鼻直後の地点では流速、摩擦速度ともに遅くなっており、石井樋(樋門)の手前で土砂を堆積させ、多布施川にできるだけ土砂が入らないようにしていると思われる。

(3) 石井樋放水路

放水路(180~360m)の川幅は、導水路と比較して変化が大きな地点はなく、約6mと狭い。平均して流速は平水時で0.906m/s、出水時で1.273m/s、摩擦速度は、平水時で10.481cm/s、出水時で14.169cm/sであり、比較的に一定の流れが保たれている。出水時になると、中礫(19mm)程度の河床材料が流され、平水時に堆積した土砂は、出水時の流れによって流されると考えられる。

6. 結論

本研究では嘉瀬川の石井樋における一次元流れ解析を行うことにより、出水の有無による土砂輸送特性の把握を行った。得られた知見は以下の通りである。

(1) 嘉瀬川本川に位置する大井手堰は、平水時に堰直前に堆積している土砂を、出水時に仕切りの開放を行うことで、土砂を押し流すと考えられる。

(2) 石井樋導水路には荒籠と出鼻が設置されており、意図的に川幅を狭めることで、流速に変化を与えて土砂を押し流す地点と堆積させる地点を特定し、土砂を輸送させていた。

(3) 石井樋放水路では川幅を導水路より狭くすることで流速を増加させ、流れ込んできた土砂を本川に輸送させていた。

(4) 嘉瀬川の石井樋は、複数の施設によって流速を増加、減少させる効果があり、その流れによって土砂を輸送していると考えられる。

(5) 石井樋には出水の有無を想定した機能があると推測される。

謝辞：本研究を遂行するにあたり貴重な資料・データを提供いただいた国土交通省武雄河川事務所、国土交通省筑後川河川事務所、佐賀県土木事務所の関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 吉村伸一・島谷幸宏：嘉瀬川・石井樋の水システムに関する考察，土木史研究講演集 Vol. 28, 83-90, 2008.
- 2) 大波修二：現存する日本最古の取水施設「石井樋」，Civil Engineering Consultant，Vol.254，9-11，2012. .
- 3) DHI：MIKE11 リファレンスマニュアル，2009.
- 4) 国土交通省：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>.
- 5) J.E. Nash and V. Sutcliffe：River Flow forecasting through conceptual models Part 1, A discussion of principles, pp.282-290, 1970.
- 6) 土木学会編：水理公式集，p.199, 1985.
- 7) 荒井信行，清水康行：現場のための水理学(3)―掃流砂と河床変動―，pp.35-43, 1988.
- 8) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，No.41, 1-21, 1956.

(2015.4.6受付)