

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13839

研究課題名(和文) 波状跳水から完全跳水への遷移を伴う流れと水面変動の準三次元解析法の研究

研究課題名(英文) Quasi-3D model for undular-hydraulic jump and hydraulic jump

研究代表者

竹村 吉晴 (Takemura, Yoshiharu)

中央大学・研究開発機構・機構准教授

研究者番号：90634684

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：従来の水深積分モデルは境界面(水面・底面)での逆流(剥離)を解析できないため、跳水形態の遷移、減勢工背後の逆流域形成をモデル化する必要があった。本研究では、境界面での逆流(剥離)とこれに伴う流速分布の変形を解析するために、境界面上の流れの方程式系を用い、跳水及びその減勢区間における非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)を開発した。Q3D-FEBSを既往実験に適用し、波状跳水、完全跳水、波状跳水から完全跳水への遷移過程を解析できること、大河津新第二床固の大型水理模型実験を対象とし、跳水及びその減勢区間の流れに対するQ3D-FEBSの有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)は、水深積分モデルの枠組みにおいて、波状跳水と完全跳水、さらに水理条件の変化に伴う跳水形態の遷移について、国内外で初めて解析可能とした。また、Q3D-FEBSは、三次元解析に比べ基礎方程式の数は増えるものの、鉛直方向の格子分割が不要なことに加え、全ての方程式が陽的に解析されるため、三次元解析に比べて計算コストを著しく節約できる。今後、大型越流構造物周辺の三次元流れを検討するための有効な手法として活用が期待される。

研究成果の概要(英文)：This paper aims at development of a non-hydrostatic quasi-three dimensional model for the flow in undular and hydraulic stilling basins. It is challenging for the depth-integrated model to calculate the flow separation at boundary surfaces (water surface and bed surface). To solve this problem, a non-hydrostatic quasi-three dimensional model considering flow equations on boundary surfaces (Q3D-FEBS) was derived. Q3D-FEBS was applied to the undular and hydraulic jump experiments. The calculation results are in good agreement with the observation data such as water surface profiles and velocity distributions of the undular and hydraulic jump. Moreover, it was showed that Q3D-FEBS can calculate the breaking process of the undular jump and, formation of the surface roller. Finally, the applicability of Q3D-FEBS for the flow in hydraulic jump stilling basins was discussed against observation data of a large scale hydraulic model experiment.

研究分野：水工学

キーワード：波状跳水 完全跳水 準三次元解析 非静水圧分布 Q3D-FEBS 河川構造物 バッフルピア

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

堰や床止めなどの河川横断構造物に付随する水叩きや護床工は、河川横断構造物を越流した高速流を跳水により減勢し、護床工直下の河床洗掘を防ぐ役割を持つ。跳水の形態は、洪水流量や下流河道の水位の影響を受けて絶えず変化し、それに伴い水叩き・護床工上の流れ構造が変化する。大きな水面変動や底面付近に高速流が生じるようになると、護床工直下の河床洗掘や護床工の隙間から土砂が吸い出され、護床工の変状や破壊に至る恐れがある。このため、護床工直下の局所洗掘対策や減勢方法について研究が行われてきたが、河川横断構造物の安定性に関する明白な判断基準はいまだ確立されていない。その最大の理由は、洪水時の跳水形態の変化を伴う三次元流れと水面変動を予測する実用的な解析法がないためである。

跳水を伴う流れの計算法には、VOF法などの界面捕獲法を導入した三次元解析やSPH法などの粒子法がある。しかし、これらの手法は計算に長時間を要し、実河川への適用は時間空間的に範囲が限定される。さらに、護床工直下の局所洗掘や護床工の隙間からの土砂の吸出し、それに伴う空洞化や浸透流の発生などは、より広域で複雑な流れと土砂の解析が要求されるため、これらの重要な問題に展開するには計算機能力の向上を待たなくてはならない。

流速鉛直分布を仮定することで、実用的な平面二次元解析の枠組みにおいて、三次元流れを求める準三次元解析法は、このような問題に有効な解析法のひとつである。しかし、跳水や減勢工周辺等の水面や底面での流れの剥離を伴うような流れに適用可能な解析法は、これまで提案されていない。水面や底面での流れの剥離は、境界面(水面と底面)で流れが逆流することをきっかけとする。このため、境界面上の流れの方程式を解析し、水面・底面流速を流速鉛直分布の境界条件に用いた非静水圧準三次元解析法を構築できれば、跳水や減勢工周辺の三次元流れを平面二次元解析の枠組みで効率的に計算できるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、水面と底面上の流れの方程式を水深平均の流れの方程式とともに解析する非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS: Quasi-3D model considering Flow Equations on Boundary Surfaces)を構築する。そして、Q3D-FEBSにより波状跳水、完全跳水、さらに波状跳水から完全跳水への遷移や減勢工の効果をどの程度再現できるか明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は2年間で行った。初年度は解析法の定式化とプログラムコードの作成とともに、基本的な波状跳水と完全跳水の既往実験を対象として解析法の検証を行った。最終年度は、現在建設中の大河津新第二床固の大型水理模型実験を対象として、越流部から減勢区間までの大規模越流構造物周辺の一連の流れに対する解析法の適用性を検討した。

Q3D-FEBSは、式(1)と式(2)に示すように、流速鉛直分布と乱れエネルギーの鉛直分布を三次関数で仮定することで未知量の数を減じ、河川の三次元流れを効率的に計算する。

$$u_i = \Delta u_i (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + \delta u_i (-4\eta^3 + 3\eta^2) + U_i \quad (1)$$

$$k = \Delta k (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + \delta k (-4\eta^3 + 3\eta^2) + K \quad (2)$$

ここで、 $i=1,2$ ($x_1=x, x_2=y$)、 u_i : x_i 方向の流速、 U_i : x_i 方向の水深平均流速、 k :乱れエネルギー、 K :水深平均の乱れエネルギー、 $\Delta u_i = u_{si} - U_i$ 、 $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$ 、 $\Delta k = k_s - K$ 、 $\delta k = k_s - k_b$ 、 $\eta = (z_s - z)/h$ 、 u_{si} : x_i 方向の水面流速、 u_{bi} : x_i 方向の底面流速、 k_s :水面での乱れエネルギー、 k_b :底面での乱れエネルギーである。Q3D-FEBSでは、水深平均の流れの方程式に加えて、水面と底面上の流れの方程式が解かれることになる。

対象とした既往実験の条件は表-1に示す通りである。

表-1 対象とした実験条件

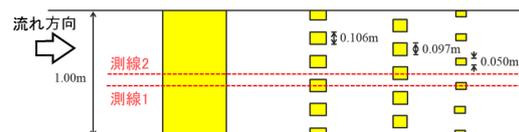
	Chanson(1993)	Gotoh(2005)	Chachereau & Chanson(2010)
跳水の形態	波状跳水	波状跳水	完全跳水
水路長(m)	20	15*	3.2
水路幅(m)	0.25	0.86*	0.5
水路勾配	1/225	1/282	水平床
流量(l/s)	4.96	87.5*	44.6
流入射流の条件			
フルード数	1.27	1.11	3.1
レイノルズ数	2.1×10^4	$1.0 \times 10^{5*}$	8.9×10^4
アスペクト比**	8.7	9	11
境界層発達状況	完全	完全	不完全

*アスペクト比 = (水路幅) / (跳水開始地点の射流水深)

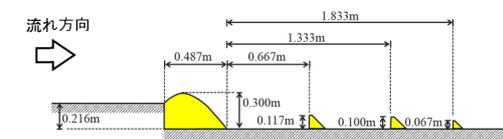
** : 論文に記載された情報からの推測値

表-2 大河津分水路大型模型実験の条件

跳水の形態	強制跳水
模型設置区間(m)	10.25
流量(m^3/s)	0.239
下流端水深($10^{-2}m$)	23.87



(a) 平面図



(b) 縦断面図

図-2 床固・水叩き区間の平面図と縦断面図

波状跳水の実験では、水路中央部における水位縦断分布と波状跳水の頂部と谷部で流速分布と圧力分布の計測が行われている。完全跳水の実験では、水路中央部において水位縦断分布と流速鉛直分布の計測が行われている。表-1の実験に加えて、Liu et al.(2014)による水路中央部における乱れエネルギーの縦断分布の計測結果を用いて、Q3D-FEBSの妥当性について検証を行った。

大河津新第二床固の大型水理模型実験は模型縮尺1/30で行われた。表-2、図-2に実験条件と床固・水叩き区間の平面図と縦断図を示す。床固の落差は実スケールで9mとなり、床固の下流にはバップルピアが三列千鳥状に配置されている。水路中央部の測線1と測線2では、水位の縦断分布と流速鉛直分布の計測が行われている。この実験結果を用いて、Q3D-FEBSにより越流部から減勢区間までの一連の流れをどの程度説明することが出来るか明らかにする。

4. 研究成果

(1) 波状跳水と完全跳水の再現性の検証

図-3に、Chanson¹⁾の波状跳水実験とQ3D-FEBSによる水面形の比較を示す。波状跳水の波状の水面形には、非静水圧が重要な役割を果たすため、解析では水面の曲率を適切に評価する必要がある。このため、共役水深の1/4と1/10の大きさの計算格子幅 Δx を用いて解析し感度を調べた。図-3に示すように、 Δx が計算結果に及ぼす影響は大きいことが分かる。 Δx を共役水深の1/10とすれば、波状跳水の水面形を二波目まで説明できる。図-4は、この時の波状跳水の頂部と谷部で計測された圧力分布とQ3D-FEBSによる圧力分布を比較している。図中の黒の直線は、静水圧分布を示す。谷部では、圧力が静水圧よりも大きく、頂部では静水圧よりも小さくなる傾向を解析も説明出来ている。一方で、波状跳水の2波目谷部では、解析の圧力分布はほぼ静水圧分布となっており、3波目以降の水面形を説明出来なかった。現在は、計算の安定性を目的に運動方程式の移流項の離散化には、一時風上を採用しており、今後、より高次のスキームを導入することで3波目以降の水面形の再現性も向上するものと考えられる。

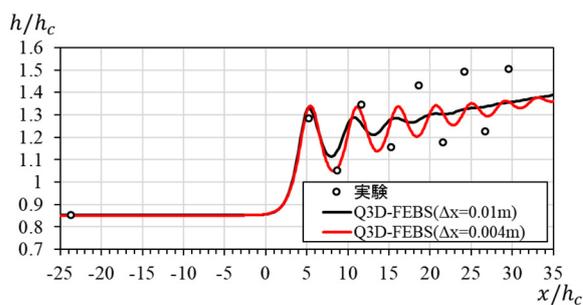


図-5 Chanson¹⁾の波状跳水実験と Q3D-FEBS による水面形の比較

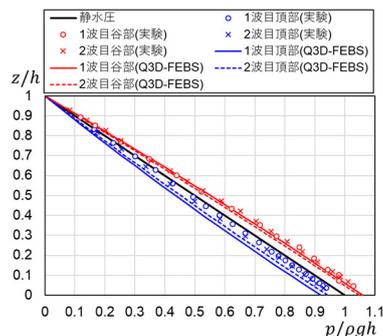


図-6 Chanson¹⁾の波状跳水実験と Q3D-FEBS による圧力分布の比較 ($\Delta x = 0.04m$)

図-7は、Chachereau & Chanson²⁾の完全跳水実験とQ3D-FEBSによる水面形の比較を示す。実験の無次元水深は、ドップラー変位計による10秒間の平均値と平均値±標準偏差の値である。解析の無次元水深は、水位変動がほぼ見られないため、10秒間の平均値のみで示した。Q3D-FEBSは完全跳水の水面形を良く説明できていることが分かる。図-8では、乱流モデルの適合性の検証を目的に、Liu et al.³⁾の実験と水路中央部の乱れエネルギー K_m の縦断分布を比較した。実験の K_m は、ドップラー流速計を用い各地点で計測された乱れエネルギーの最大値であり、流入射流の流速 U_1 で無次元化されている。縦断距離は、跳水開始地点を原点にとり、水路下流端の水深 y_2 で無次元化している。解析は、実験の乱れエネルギーの大きさをほぼ説明出来ている。Liuらは、図-8の黒の実線で示すように、 $K_m^{0.5}/U_1$ が x/y_2 に対し直線的に減衰することを定式化している。解析は、黒の実線に比べやや減衰速度が速いものの、この傾向を説明できている。以上の検討から、Q3D-FEBSは波状跳水と完全跳水を統一的に説明できる解析モデルであることが分かった。

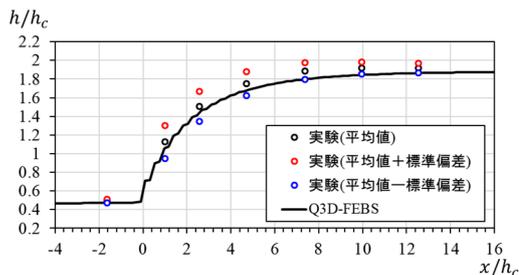


図-7 Chachereau & Chanson²⁾の完全跳水実験と Q3D-FEBS による水面形の比較

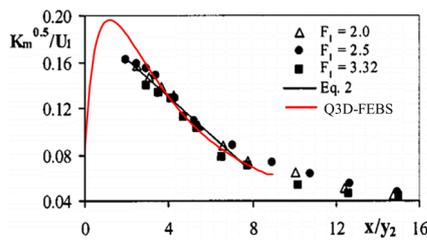


図-8 Liu et al.³⁾の完全跳水実験と Q3D-FEBS による乱れエネルギー縦断分布の比較

(2) 跳水形態の遷移過程の解析

図-10は、上記条件の下で Q3D-FEBS による波状跳水から完全跳水への跳水形態の遷移過程の解析結果を示す。図-10(a), (b), (c)に示すように、流量の上昇に伴いフルード数が増大することで、跳水開始位置が下流に移動し波状跳水の一波目頂部で水面流速が減速し始めている。その後、図-10(d), (e)に示すように、フルード数が 2.1 まで上昇すると波高の減衰が明白に見られるようになり、水面付近の逆流域の拡大とともに跳水の開始位置が上流側に移動する。上流端の流量を $0.0446 \text{ m}^3/\text{s}$ 、下流端の水深を 0.172 m まで上昇させた後（フルード数 3.1）、10 秒程度通水を続けると、最終的に図-12(f)に示すような完全跳水の状態の流れが安定する。

Q3D-FEBS がこのような非定常性の高い現象に対してどの程度の再現性を持つかは、今後、実験等から確かめる必要があるが、少なくとも水面上の逆流とこれに伴う流速鉛直分布、圧力分布の変形等を解析することで、水深積分モデルの枠組みで、波状跳水から完全跳水への遷移過程が解析可能であることが分かった。

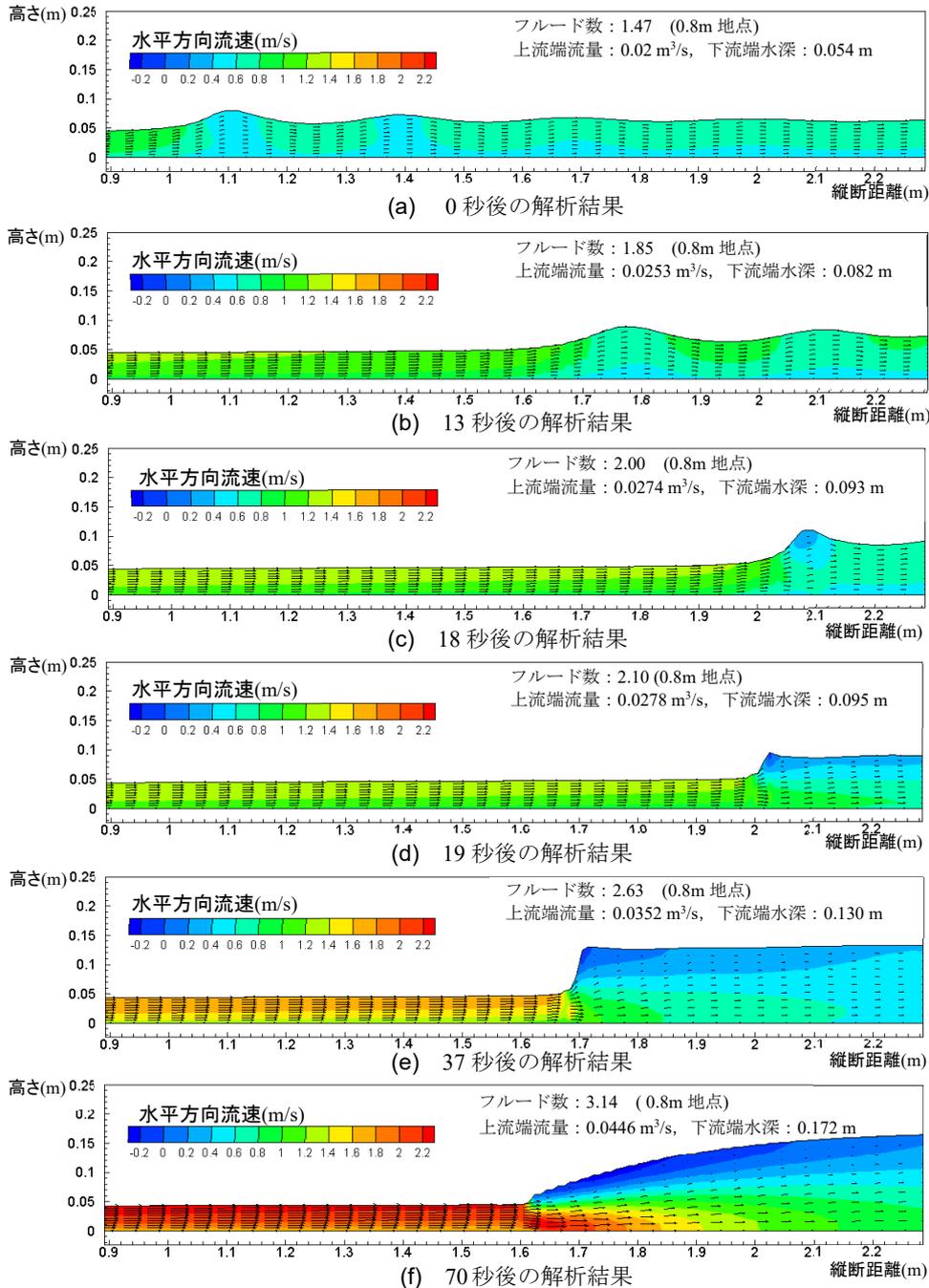


図-10 Q3D-FEBS による波状跳水から完全跳水への遷移過程の解析結果

(3) 跳水及びその減勢区間における一連の流れの解析

写真-1は、国土交通省信濃川河川事務所により行われた大河津新第二床固の縮尺 1/30 の大型水理模型実験実験の床固・水叩き区間の流況を側方から撮影した写真である。図-11は、図-2(a)の側線 1 上の実験と解析の水位縦断分布と流速鉛直分布の比較である。解析水位は、 $x=2.4 \text{ m}$ 付

近で観測水位に比べて若干低くなるものの、その他の地点ではプロットで示す実験水位の平均値と最大値の間にあり、実験結果を良く説明している。また、写真-1 から、実験では一列目のバップルピア上流で強制跳水が生じている。図-11(b)に示す解析は、写真-1 から確認できる跳水の開始位置や形状を再現しており、実験の $x=0.4\text{m}$ 付近における水面流速の逆流と大きな底面流速の発生を説明できている。図-11(a)に示すように、実験ではバップルピア背後で逆流域が形成され、一列目のバップルピアより下流では最大流速発生位置が底面付近から水面付近に移動している。図-11(b)に示す解析では、一列目と二列目のバップルピアの間の最大流速発生位置が実験に比べ低い位置に生じている。Q3D-FEBS では、水平方向流速の鉛直分布を式(1)の三次関数で仮定しているが、底面での流速勾配が境界条件として考慮されないため、最大流速発生位置が水面付近よりやや下方に生じ易くなっている。このことが、一列目と二列目のバップルピアの間の最大流速発生位置を十分に説明できない主な理由である。上述の課題はあるものの、解析は最大流速発生位置が二列目のバップルピアから下流で次第に水面付近に移動する実験の流れの特徴を良く説明できている。

以上のように、Q3D-FEBS は大きな落差（実スケールで 9 m）を持つ構造物を越流する流れとバップルピアによる強制跳水、バップルピア背後での逆流域の形成や最大流速発生位置の水面付近への移動を水深積分モデルの枠組みで解析できており、大規模越流構造物下流の跳水及びその減勢区間における流れの解析に有効であることが分かった。

本研究では、跳水及びその減勢区間の流れを対象とした検討を行ったが、Q3D-FEBS は境界面（水面・底面）上の流れの方程式系を解くことから、境界面形状の変化が大きい三次元流れ場の解析に適している。このため、十分発達した砂州周辺の流れと河床変動、河岸侵食、山地河川の流れや溪流等への応用が期待される。



写真-1 計画流量 11,000m³/s を想定した新第二床固大型水理模型実験の流況

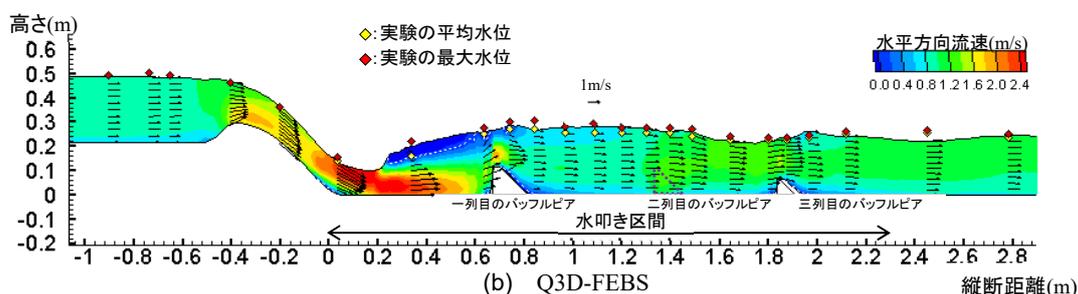
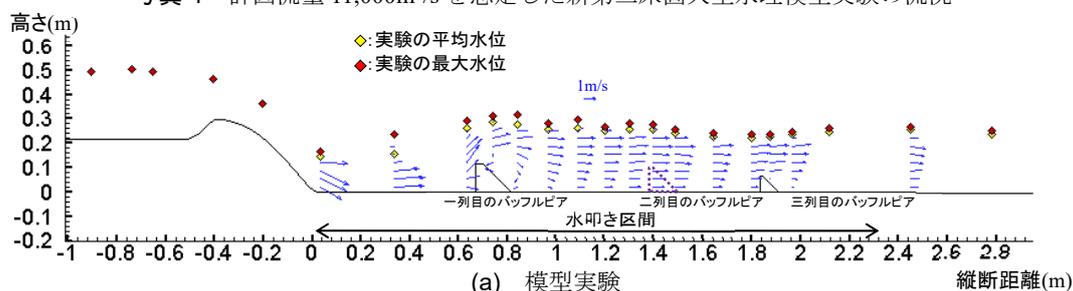


図-11 測線 1 上の実験と Q3D-FEBS の水位縦断分布と流速鉛直分布の比較

<引用文献>

- 1) Chanson, H.: Characteristics of undular hydraulic jumps, *Research Report CE146, Department of Civil Engineering, The University of Queensland*, 1993.
- 2) Chacherea, Y. and Chanson, H.: Free-surface turbulent fluctuations and air-water flow measurements in hydraulics jumps with small inflow Froude numbers, *Report CH78/10, School of Civil Engineering, The University of Queensland*, 2010.
- 3) Liu, M., Rajaratnam, N. and Zhu, D. Z.: Turbulence structure of hydraulic jumps of low froude numbers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.130, No.6, pp.511-520, 2014

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 竹村 吉晴, 福岡捷二	4. 巻 75 巻
2. 論文標題 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面（水面・底面）上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1（水工学）	6. 最初と最後の頁 61-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2208/jscejhe.75.61	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 竹村吉晴, 児子真也, 大野純暉, 福岡捷二	4. 巻 第25巻
2. 論文標題 巨岩・巨石が点在する山地河川に対する平面二次元解析法の課題と新しい解析法の提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 267-272
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 竹村 吉晴 , 小野 伊佐緒, 伊藤 幸義
2. 発表標題 大型床固めに接続する魚道周辺の三次元流況 大型水理実 験と準三次元解析による比較検討
3. 学会等名 平成30年度土木学会全国大会 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大野純暉, 福岡 捷二, 竹村吉晴
2. 発表標題 非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS）を用いた巨石の点在する山地河川の洪水水面形
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiharu Takemura, Shoji Fukuoka
2. 発表標題 ANALYSIS OF FLOWS IN UNDULAR AND BREAKING HYDRAULIC JUMPS BY NON-HYDROSTATIC QUASI THREE-DIMENSIONAL MODEL CONSIDERING FLOW EQUATIONS ON BOUNDARY SURFACES (Q3D-FEBS)
3. 学会等名 IAHR World Congress 2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中央大学研究開発機構 福岡ユニット ホームページ http://c-faculty.chuo-u.ac.jp/~sfuku/sfuku/

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考