

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560628

研究課題名(和文) 空気混入流の水力特性に基づく階段状水路水力設計法の開発

研究課題名(英文) Hydraulic design of stepped channels based on aerated flow characteristics

研究代表者

高橋 正行 (TAKAHASHI, Masayuki)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：10318363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：階段状水路上の流れは空気混入流として特徴づけられる。階段状水路の水工設計のためには、空気混入水流の特性すなわち空気混入水流の水深、空気混入率、流速、および比エネルギーを知ることが重要である。最近、研究代表者は広範囲の水路傾斜角度とステップ高さに対して、空気混入擬似等流の水力特性を明らかにした。しかしながら、空気混入不等流の空気混入特性は明らかにされていない。この研究では、空気混入不等流の水面形方程式を導出した。また、広範囲の水理量に対して、空気混入不等流の水理量を明らかにした。この結果に基づき、空気混入skimming flowを対象とした階段状水路の水理設計法を示した。

研究成果の概要(英文)：Generally, stepped channel flows are characterized as aerated flows. For the design of stepped channels, it is important to know the aerated flow characteristics such as the aerated flow depth, the air-concentration ratio, the aerated flow velocity, and the energy head in skimming flows. Recently, the project leader clarified the aerated flow characteristics for the quasi-uniform flow region of skimming flows under a wide range of channel slopes. However, for the nonuniform flow region, the aerated flow characteristics were not elucidated. In this study, an equation for the calculation of the aerated flow depth is developed in the nonuniform aerated flow region, and the aerated flow characteristics are determined for the nonuniform aerated flow region under a wide range of hydraulic conditions.

研究分野：水工水理学

キーワード：階段状水路 空気混入水流 エネルギー損失 skimming flow 比エネルギー 水理構造物

1. 研究開始当初の背景

傾斜水路の越流面を階段にすることで、高速流の運動エネルギーを階段状水路上で減勢できることは直感的に理解でき、古くはローマ時代から階段状水路が用いられている。しかしながら、階段状水路では飛沫を伴う空気混入流が形成され(図-1)、水面の決定は困難であり、正確な水深・流速評価が不可能であったために、階段状水路によるエネルギー減勢効果については不明であった。

従来、階段状水路上の流れのエネルギー水頭について跳水を利用して間接的に評価する試みがなされていた¹⁾²⁾。しかしながら、この方法は間接評価法であるため、水深と流速の評価が明確になされたとは言えない。2000年頃から空気混入水流の流速の測定が可能となり、Boes and Hager³⁾は階段状水路における空気混入流の時間平均空気混入率 C と流速 u を測定し、階段状水路の擬似等流状態での流水抵抗を明らかにしようとしたが、空気混入流のエネルギー評価までには至らなかった。

研究代表者は、階段状水路での空気混入流特性(空気混入流の流速、水深、およびエネルギーの大きさ)の解明を目的に研究を進め、これまで不明であった空気混入流のエネルギー評価法の解明に成功していた。また、そのエネルギー評価法を用いて、擬似等流状態の空気混入流を対象に空気混入流の水深、流速、エネルギーの大きさを明らかにしていた。

国内外の研究においては、特定の傾斜角度を対象に空気混入率および流速の測定を実施した事例研究はある⁴⁾⁵⁾ものの、広範囲の傾斜角度とステップ高に対する系統的实验による検討は全くなされていなかった。さらに、階段状水路を用いる場合、擬似等流状態が形成されない程度の水路長の場合もあり、空気混入不等流の空気混入特性の解明および水面形計算法の開発がまたれていた⁶⁾。そこで研究代表者は、空気混入特性を考慮したエネルギー評価法を發展させることで、空気混入特性を考慮した不等流の水面形計算法を開発できるものと着想した。

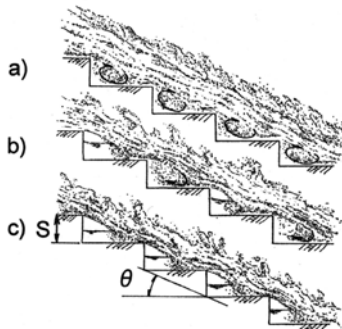


図-1 階段状水路での流況
a)skimming flow; b)transition flow;
c)nappe flow

2. 研究の目的

急傾斜地の水路や堰・ダムを流下する高速流を傾斜面上で減勢させる目的で階段状水路が採用されている。しかし、高速流のエネルギーをどの程度減勢させる効果があるのか不明である。なぜならば、階段状水路では飛沫を伴う空気混入流が形成され(図-2)、目視による水面の決定が困難であり、水深・流速の評価が不明確なためである。水工設計上、階段状水路における空気混入水流の水深、流速、エネルギー水頭の大きさを予測することが重要である。本研究課題では階段状水路における空気混入水流の特性を広範囲な水路傾斜角度とステッ



図-2 階段状水路の空気混入流
(水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$)

プ高さのもとで不等流および等流の両区間を対象に解明し、階段状水路の水理設計法を明確にしようとするものである。

3. 研究の方法

(1) 空気混入水流の水理特性の解明

階段状水路の空気混入水流での水理設計を行うためには、空気混入水深、流速、および比エネルギーの評価が必要である。embankment dam や重力式コンクリートダムで用いられる洪水吐を想定し、水路傾斜角度 $\theta=18^\circ\sim 55^\circ$ を対象に、空気混入水流の水深、流速、比エネルギーを明らかにするため、空気混入率と流速の値を測定した。また、Bung (2011)⁷⁾や Boes and Hager (2003)³⁾の空気混入率および流速の測定値を用いて、比エネルギー水頭を求めた。

(2) 空気混入水流の水面形計算法

階段状水路における空気混入 skimming flow の水面形については、空気混入の影響を考慮した水面形方程式を導出した。また、空気混入の影響を考慮にいれた比エネルギーの評価法を導出することに成功した。空気混入の影響を考慮して比エネルギーを求めるためには、空気混入率分布および流速分布を明らかにする必要がある。これについては、次の研究成果で示すように明らかにすることができた。研究代表者が導出した比エネルギー評価法ならびに空気混入率および流速分布を用いることで、解析的に空気混入水流の水深、流速、および比エネルギーを求めることが可能になった。

4. 研究成果

(1) 空気混入率分布

不等流区間の skimming flow の断面平均空気混入率 C_m は、 $Re \geq 3 \times 10^4$ の場合、次の関係で整理されるものと考えられる。

$$C_m = \text{func} \left(\frac{x_s - x_i}{d_c}, \frac{S}{d_c}, \theta \right) \quad (1)$$

ここに、 x_s は階段状水路始端から評価断面までの流下距離、 x_i は階段状水路始端から inception point までの流下距離である。 C_m の測定結果を(1)の関係式で整理した一例を図-3(a)に示す。図に示されるように、inception point 下流側では流下距離 $(x_s - x_i)/d_c$ の増加とともに、 C_m の値が大きくなるのがわかる。

Inception point 下流側 skimming flow の空気混入不等流の C_m の変化について、Chanson は気相の連続の式の適用を試みている⁸⁾が、広範囲な θ と S/d_c に対して系統的検討がなされていない。気相の連続式は(2)式で示されている⁸⁾。

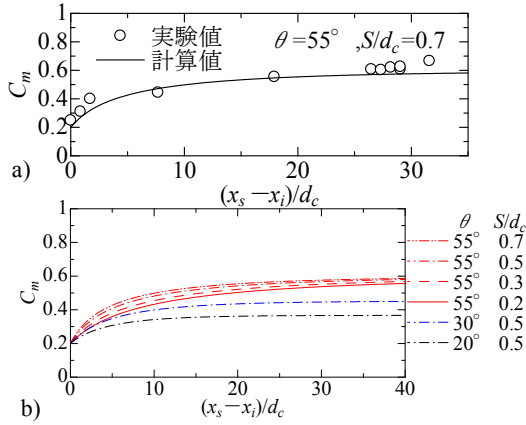


図-3 断面平均空気混入率

$$\frac{1}{(1-C_{mu})^2} \text{Ln} \left(\frac{1-C_m}{C_{mu}-C_m} \right) - \frac{1}{(1-C_{mu})(1-C_m)} \quad (2)$$

$$= k_0 \frac{x_s/d_c - x_i/d_c}{d_{wi}/d_c} + K_0$$

ここに、 $k_0 = u_r d_{wi} \cos \theta / q_w$, $K_0 = 1/(1-C_{mu}) [1/(1-C_{mu}) \text{Ln} \{ (1-C_{mu}) / (C_{mu}-C_m) \} - 1/(1-C_{mu})]$, C_{mu} は擬似等流区間の C_m , u_r は気泡の上昇速度, d_{wi} は inception point の水深である。(2)式より,境界条件として inception point での断面平均空気混入率 $C_{mi} (=0.2)$ を与え,さらに擬似等流状態の断面平均空気混入率 C_{mu} および気泡の上昇速度 u_r を与えると,空気混入不等流の任意断面 $(x_s-x_i)/d_c$ での C_m の値を求めることができる.ここでは, $u_r=0.4\text{m/s}$ としている^{8)c}.また,擬似等流状態の断面平均空気混入率 C_{mu} は Takahashi and Ohtsu によって示されている次式⁹⁾を用いる.

$$C_m = \left(\frac{6.9}{\theta} - 0.12 \right) \frac{S}{d_c} + 0.656 \left\{ 1 - e^{-0.0356(\theta-10.9)} \right\} + 0.073 \quad (\theta \text{ in deg.}) \quad (3)$$

$\theta=55^\circ$ の場合の計算結果の一例を図-3a)の実線に示す.図に示されるように,計算値は実験値を満足している.また, $\theta=18^\circ$ と 27° についても気相の連続式(2)式による C_m の計算値は Bung による C_m の実験値⁹⁾を満足していることが確かめられた.すなわち,広範囲な水路傾斜角度($18^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$)の skimming flow に対して(2)式は適用可能である.図-3b)に種々の θ と S/d_c に対する C_m の計算結果を示す.図に示されるように,与えられた $(x_s-x_i)/d_c$ に対して θ と S/d_c の増加ともない C_m は増加している.また,与えられた θ と S/d_c に対して $(x_s-x_i)/d_c$ の増加ともない C_m は増加し,やがて擬似等流状態に近づくとも一定値に漸近する.

図-3のように C_m の流下方向変化が与えられると空気混入不等流中の各断面での空気混入率 C の分布は Chanson による気泡の拡散モデル^{8)b)}(4)式を用いて近似できるものと考えられる.

$$C = 1 - \tanh^2 \left(k' - \frac{1}{2D'} Y \right) \quad (4)$$

ここに, $Y = y/y_{0.9}$, $D' = (0.848C_m - 0.00302) / (1 + 1.1375C_m - 2.2925C_m^2)$, $k' = \tanh^{-1}(0.1)^{1/2} + 1/(2D')$ である.系統的に θ と S/d_c を変化させ, $C_m = \text{func}[(x_s-x_i)/d_c, \theta, S/d_c]$ の関係を解析的に求め,気泡の拡散モデル(4)式を用いて C の分布を表したものを図-4に示す.図に示されるように,与えられた θ と S/d_c に対して, inception point $[(x_s-x_i)/d_c=0]$ では空気混入率 C

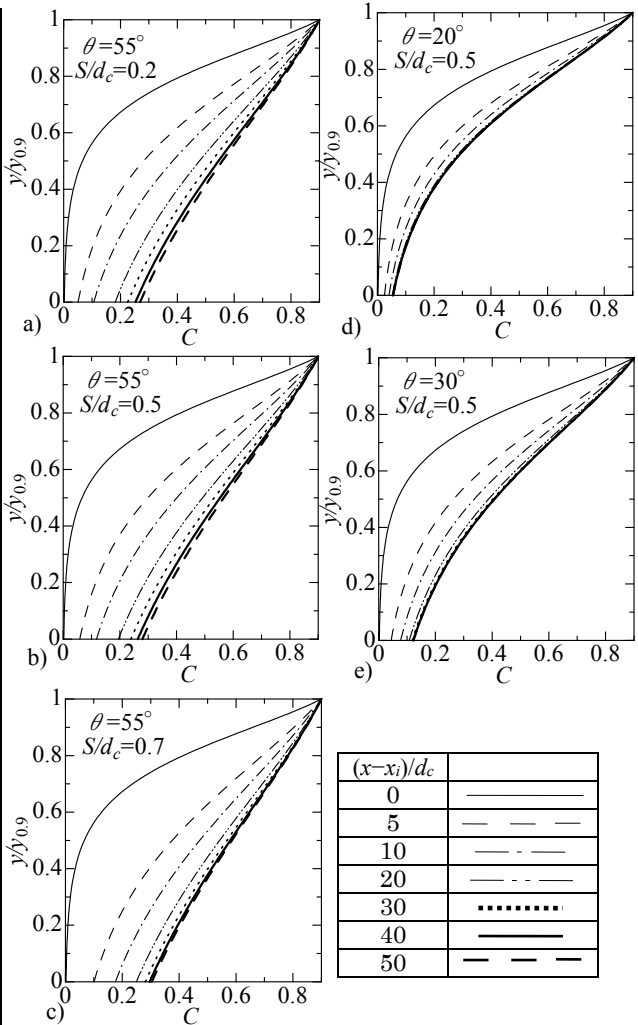


図-4 空気混入率分布 $\theta = 55^\circ$, $S/d_c = \text{a) } 0.2, \text{ b) } 0.5, \text{ c) } 0.7$; $S/d_c = 0.5, \theta = \text{d) } 20^\circ, \text{ e) } 30^\circ$

は水面近くで大きく,仮想底面に近づくにつれて 0 に漸近している.すなわち, inception point の水面近くで流れに空気を取り込まれている様子が示されている.また,与えられた $\theta, S/d_c, y/y_{0.9}$ に対して $(x_s-x_i)/d_c$ を大きくすると C は大きくなる.さらに $(x_s-x_i)/d_c$ を大きくすると擬似等流状態となり,与えられた $y/y_{0.9}$ に対して C の値は一定となる.なお,与えられた $(x_s-x_i)/d_c$ と $y/y_{0.9}$ に対して, θ と S/d_c の増加ともない C の値は大きくなる.以上より,気相の連続式(2)式から C_m を求め,気泡の拡散モデル(4)式を用いることで,不等流区間の空気混入率分布を示すことが可能となった.

(2) 流速分布

階段状水路の不等流区間の skimming flow において, $Re \geq 3 \times 10^4$ の場合,空気混入流の流速 u は次の関係で整理されるものと考えられる.

$$\frac{u}{u_{0.9}} = \text{func} \left(\frac{y}{y_{0.9}}, \frac{x_s-x_i}{d_c}, \frac{S}{d_c}, \theta \right) \quad (5)$$

ここに, $u_{0.9}$ は $y = y_{0.9}$ での流速である.(5)式の関係で実験値を整理した一例を図-5に示す.図に示されるように,流速分布は $(x_s-x_i)/d_c$ によらず $1/N$ 乗則[(6), (7)式]で示される.

$$u/u_{0.9} = (y/y_{0.9})^{1/N} \quad (6)$$

あるいは

$$U = Y^{1/N} \quad (7)$$

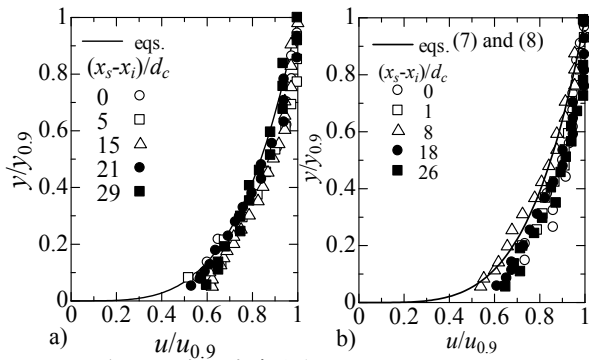


図-5 空気混入流の流速分布($\theta = 55^\circ$, $S/d_c =$ a)0.3, b)0.7)

ここに、 $U=u/u_{0.9}$, $Y=y/y_{0.9}$ である。与えられた θ と S/d_c に対して、不等流区間および擬似等流区間ともに N の値はほぼ等しい(図-5)。この傾向は $\theta=18^\circ, 27^\circ$ についても Bung の実験結果⁹⁾からも確認される。以上より、擬似等流区間の N の実験式⁹⁾ [(8)式]は不等流区間においても適用できる。

$$N = 14\theta^{-0.65} \frac{S}{d_c} \left(\frac{100 S}{\theta d_c} - 1 \right) - 0.041\theta + 6.27 \quad (\theta \text{ in deg.}) \quad (8)$$

すなわち、 $\theta=19^\circ \sim 55^\circ$ の skimming flow の空気混入流の流速分布が不等流区間に対しても擬似等流と同様に予測可能となった。

・空気混入における水面形
空気混入流を連続体として取り扱い、空気混入率の変化を密度変化として表わすものとする。空気混入水流の水面形方程式は次のように示される。

$$\frac{dd_w}{dx} = \sin\theta \frac{d_w^3 - d_{wu}^3}{C_p d_w^3 \cos\theta - C_v d_c^3} \quad (9)$$

ここに、 d_w は水のみで換算した水深であり、

$$d_w = \int_0^{y_{0.9}} (1-C) dy = (1-C_m) y_{0.9} \quad (10)$$

で定義されている。また、 d_{wu} は等流水深、 d_c は限界水深、 C_v は速度水頭の補正係数、 C_p はピエゾ水頭に関わる補正係数である。なお、水のみ流れ($C=0$)の場合は $C_p=1$ 、 $C_v=\alpha \approx 1$ (α はエネルギー補正係数)となり、(9)式は広長方形断面の水面形方程式と一致する。流れは射流であるため、境界条件は inception point を計算原点($x=x_i$)とし、そこでの clear water depth d_{wi} を与え¹⁰⁾、下流側に向かって(9)式を数値積分すると不等流区間の clear water depth d_w が求まる。ここに、 $y_{0.9}$ は空気混入流水深である。空気混入流の代表水深としては、clear water depth d_w は仮想の水深であるため $y_{0.9}$ を用いることが妥当である。本計算による clear water depth d_w と C_m の値と(10)式を用いると $y_{0.9}$ が得られる(図-6 破線参照)。図-6に示されるように、 $\theta=55^\circ$ の場合の計算値と実験値の $y_{0.9}/d_c$ はほぼ一致し、空気混入流水深 $y_{0.9}/d_c$ は $(x_s-x_i)/d_c$ の増加にともない大きくなり、やがて一定値に漸近する。なお、 $\theta=18^\circ$ と 27° の場合も計算値と実験値はほぼ一致していることが Bung の実験結果⁹⁾から確かめられた。すなわち、 $18^\circ \leq \theta < 55^\circ$ の skimming flow に対して本解析法が適用可能である。

(3) 空気混入水流の比エネルギー

仮想底面を基準面とすると空気混入流の比エネルギー E_s は次式で示される。

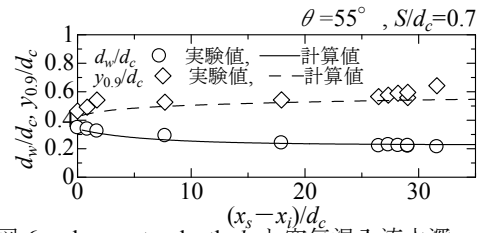


図-6 clear water depth d_w と空気混入流水深 $y_{0.9}$

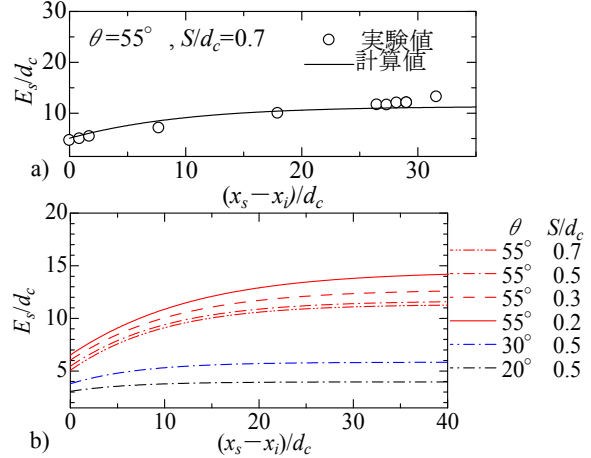


図-7 空気混入流のエネルギー水頭

$$E_s = C_p d_w \cos\theta + C_v \frac{V_w^2}{2g} \quad (11)$$

空気混入率 C と流速 u の測定値を用い d_w および V_w を求め、空気混入率と流速分布から C_v および C_p を求め、(11)式を用いて空気混入流のエネルギー水頭 E_s/d_c を算出した結果を図-7a)に示す。図-7a)に示されるように計算値は実験値と一致し、与えられた θ と S/d_c に対して、不等流区間においては $(x_s-x_i)/d_c$ の増加に伴い E_s/d_c が大きくなり、擬似等流区間において E_s/d_c はほぼ一定となる。また、与えられた θ と $(x_s-x_i)/d_c$ に対して、相対ステップ高 S/d_c の増加に伴い E_s/d_c は小さくなるが、 $0.5 \leq S/d_c \leq (S/d_c)_s$ [($S/d_c)_s$ は skimming flow となる上限の S/d_c の値]の範囲では E_s/d_c に対する S/d_c の影響は小さくほぼ一定値となっている。さらに水路傾斜角度 θ を変化させた計算によると、与えられた S/d_c と $(x_s-x_i)/d_c$ に対して θ の増加にともない E_s/d_c の値は増加することが確かめられる。

(4) 空気混入水流の水理量計算法

本研究の方法で種々の θ , S , q_w , x_s に対して階段状水路の skimming flow の不等流区間の C_m , d_w , $y_{0.9}$, E_s を予測することが可能になった。すなわち、研究代表者が解明した擬似等流状態の空気混入流特性⁹⁾と本研究による不等流区間の空気混入特性から inception pint 下流側の全ての領域の空気混入流の特性量の算定が可能になった。これらを用いることで、階段状水路の水工設計に必要な水深、流速、空気混入率、比エネルギーを定量的に決められるようになった。

参考文献

- 1) Pegram, G. G. S., Officer, A. K., Mottram, S. R.: Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways, *J. Hydraul. Eng.*, 125(5), 500-510, 1999.
- 2) Ohtsu, I., Yasuday, Y., Takahashi, M.: Flow

- characteristics of skimming flows in stepped channels, *J. Hydraul. Eng.*, 130(9), 860-869, 2004.
- 3) Boes, R. M., Hager, W. H.: Two-phase flow characteristics of stepped spillways, *J. Hydraul. Eng.*, 129(9), 661-670, 2003.
 - 4) Bung, D. B.: Self-aerated cascade flow on moderate slope, *PhD Thesis*, Bergische University, Wuppertal, Germany (in German).
 - 5) Chanson, H., Toombes, L.: Hydraulics of stepped chutes: The transition flow, *J. Hydraul. Res.*, 42(1), 43-54, 2004.
 - 6) Sakhalkar, S. V., Tatewar, S. P., Ingle, R. N.: Discussion of flow characteristics of skimming flows in stepped channels, *J. Hydraul. Eng.*, 132(5), 539-540, 2006.
 - 7) Bung, D. B.: Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways, *J. Hydraul. Res.*, 49(5), 639-648, 2011.
 - 8) Chanson, H. : *The hydraulics of stepped chutes and spillways*, AA.Balkema, Lisse, The Netherlands, a) p.148, b) p.154, c) pp.172-175, 2002.
 - 9) Takahashi, M., Ohtsu, I.: Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes, *J. Hydraul. Res.*, Vol. 50, No.4, pp.427-434, 2012.
 - 10) 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路の skimming flow における空気混入不等流解析, *土木学会論文集B1(水工学)*, 69(4), I_913-I_918, 2013.

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 4 件)

- ① Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Analysis of nonuniform aerated skimming flows on stepped channels, *Proceedings of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, 査読有, DOI: 10. 14264/ uql. 2014. 18, 2014.
- ② 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路における nonaerated skimming flow, *土木学会論文集 B1(水工学)*, 査読有, 70 巻 4 号, pp.I_781-I_786, 2014.
- ③ Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Closure to aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes, *Journal of Hydraulic Research*, 査読有, 51 巻 6 号, pp. 736-739, DOI: 10. 1080/ 00221686. 2013. 861365, 2013.
- ④ 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路における skimming flow における空気混入不等流解析, *土木学会論文集 B1(水工学)*, 査読有, 69 巻 4 号, pp.I_913-I_918, 2013.

[学会発表] (計 10 件)

- ① 山元雄生, 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路における nonaerated skimming flow のエネルギー, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山大学, 岡山県岡山市, 2015.9.16-18.
- ② 山元雄生, 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路における nonaerated skimming flow, 第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会, 東海大学, 神奈川県平塚市, 2015. 3. 6.
- ③ 山元雄生, 高橋正行 : 階段状水路における nonaerated skimming flow の水面形方程式, 第 57 回日本大学工学部学術研究報告会, 日本大学工学部, 福島県郡山市, 2014.12.13.
- ④ 山元雄生, 高橋正行 : 階段状水路における nonaerated skimming flow の水面形方程式, 第 58 回日本大学理工学部学術講演会, 日本大学理工学部, 東京都千代田区, 2014.12.6.
- ⑤ 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路における nonaerated skimming flow, 第 58 回水工学講演会, 神戸大学, 兵庫県神戸市, 2014.3.6.
- ⑥ 山元雄生, 高橋正行 : 階段状水路における non-aerated skimming flow のエネルギー特性, 第 57 回日本大学理工学部学術講演会, 日本大学理工学部, 東京都千代田区, 2013.12.7.
- ⑦ 大熊稔生, 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路における non-aerated skimming flow の水理特性, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 日本大学生産工学部, 千葉県習志野市, 2013.9.4.
- ⑧ 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路の skimming flow における空気混入不等流解析, 第 57 回水工学講演会, 名城大学, 愛知県名古屋市, 2013.3.7.
- ⑨ 大熊稔生, 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路における non-aerated skimming flow の水理特性, 第 55 回日本大学工学部学術研究報告会, 日本大学工学部, 福島県郡山市, 2012.12.1.
- ⑩ 大熊稔生, 高橋正行, 大津岩夫 : 階段状水路における non-aerated skimming flow の水理特性, 第 56 回日本大学理工学部学術講演会, 日本大学理工学部, 東京都千代田区, 2012.11.28.

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 正行 (TAKAHASHI, Masayuki)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 10318363