河床変動解析による 矢田川弁天淵の消失原因の究明

STUDY ON THE CAUSE OF DISAPPEARANCE OF THE BENTENBUCHI POOL IN THE YADAGAWA RIVER BY RIVERBED VARIATION ANALYSIS

梶川勇樹¹・荒木峻矢²・檜谷治³

Yuki KAJIKAWA, Syunya ARAKI and Osamu HINOKIDANI

¹正会員 博(工) 鳥取大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²正会員 愛知県 建設部港湾課 (〒460-8501 名古屋市中区三の丸3丁目1番2号)

³正会員 工博 鳥取大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

A huge deep pool called ‘Bentenbuchi’ existed in the Yadagawa river which flows the northern part of Hyogo prefecture until the 1970s. However, the Bentenbuchi pool is filled with sediment and has disappeared as of 2013. In this study, the cause of disappearance of the Bentenbuchi pool and the mechanism of the disappearance were examined. First, from the comparisons of the aerial photographs from the 1970s, it was shown that the Bentenbuchi pool has disappeared after the installation of the Ono weir in the 1980s. Then, 2-dimensional riverbed variation analysis with consideration to the existence or nonexistence of the weir was performed. From the results of analysis, it was specified that the installation of the Ono weir is the cause of disappearance of the pool, and the mechanism was also clarified.

Key Words : riverbed variation analysis, WENO scheme, the Bentenbuchi pool, the Yadagawa river

1. はじめに

兵庫県北部を流れる矢田川は、兵庫県と鳥取県の県境である赤倉山に源を発し日本海に注ぐ流路延長約38km、流域面積約277km²の2級河川である(図-1)¹⁾。矢田川下流域には、河口から約8km上流の左岸側に「弁天岩」と呼ばれる大岩が存在する。かつて、その弁天岩前面には「弁天淵」と呼ばれる矢田川最大級の淵が存在し、鮎釣りの名所、子供たちの川遊びの場として地域住民に親しまれていた。しかしながら、2013年現在、淵には大量の土砂が堆積し大半が陸化している。2010年には淵を再生するための実験的工事が行われたものの、2011年の出水により再び淵は消滅し、継続的な淵の再生・維持には至らなかった。そこで、2013年、淵の再生に向け官民学が連携した「弁天淵再生研究会」が立ち上げられ、淵再生に向けた最適な手法について検討が進められている。

ところで、このような淵の再生等に関する事業を実施する際、2006年に国土交通省より示された「多自然川づくり基本指針」に従い、可能な限り自然の特性やメカニズムを活用して実施することが求められている。しかしな

図-1 矢田川の概要と弁天淵(岩)位置

がら、自然の特性やメカニズムは個々の河川で異なり、未解明な領域も多い。特にメカニズムという点で、本研究で対象とする弁天淵では、淵が消失した原因およびそのメカニズムが未解明な状態である。淵の消失原因およびメカニズムを解明し、その結果を反映した淵再生手法を実施しなければ、再度淵が消失してしまう恐れがある。

従来、淵の形成あるいは再生に関する研究は数多く行われている²⁾⁴⁾。一方、淵の消失に関する研究は殆ど例

図-2 弁天淵周辺の河床形状 (2013年9月20日測量)

図-3 河床材料粒度分布 (2013年10月19日)

図-4 弁天淵地点ハイドログラフ

を見ない。一般に、淵の消失原因は、河川改修等に伴う流況の平滑化、あるいは上流域からの供給土砂量・質の変化など、様々な要因が複合的に関連している²⁾⁵⁾として結論付けられている。しかしながら、弁天淵において最適な淵再生手法を検討するためには、淵の消失に最も影響を及ぼしている原因を明らかにしておく必要がある。

そこで本研究では、矢田川弁天淵を対象とし、淵の消失原因の究明を試みた。まず、過去からの航空写真の比較より、弁天淵および周辺河道の変遷について考察した。次に、浅水流モデルに基づく河床変動解析により、淵消失の原因およびそのメカニズムについて検討した。

2. 弁天淵周辺の概要とその変遷

まず、弁天淵周辺の概要、および2013年現在の状況について説明する。図-2は弁天淵周辺の河床形状を、また、図-3は図-2における河床材料採取地点（平水時の水際に相当）での粒度分布を示したものである。ここで、図-2に示す座標軸は、後に示す数値解析での計算座標である。また、図-3に示す上層とは、河床表面から最大粒径程度の深さまでであり、下層は上層底面からさらに最大粒径程度の深さまでを指す。図-2より、弁天淵（岩）は矢田川の左岸屈曲部に位置しており、その直上流には「幸谷川」と呼ばれる小河川が流入している。上流弯曲部には

(a) 弁天淵（岩）周辺全景

(b) 弁天岩前面

写真-1 弁天淵周辺の様子 (2013年8月7日撮影)

(a) 1976年 (昭和51年)

(b) 1980年 (昭和55年)

(c) 1994年 (平成6年)

(d) 2012年 (平成24年)

図-5 弁天淵航空写真

「椎ヶ淵」と呼ばれる大岩と淵が右岸側に存在し、さらに上流には「大野井堰」と呼ばれるコンクリート製の井堰が設置されている。大野井堰上流部では河道は左に強く弯曲しており、弁天淵下流部では右に緩やかに弯曲した河道形状となっている。大野井堰から弁天淵までの河床勾配は約1/380であり、河床材料の上層平均粒径は63.9 mmであった。図-4は、図-1に示される水位局香住での水位および縦横断面図より、等流状態を仮定して流量に変換し、流域面積比から算出した弁天淵地点（幸谷川流量は除く）のハイドログラフ（2011年2月14日以降）である。2012年および2013年の流況曲線より求めた平水流量は約12m³/sであった。次に、写真-1に2013年現在の弁天淵周辺の様子を示す。写真-1 (a) および図-2から分かるように、弁天淵上流の左岸側には砂州が形成されている。

また、写真-1(b)より、2013年現在、弁天淵には砂州前縁が到達し、土砂の堆積により大半が陸化している。2010年には、この砂州を除去し、右岸側に移す実験的工事が行われた。一時は淵の回復が見られたものの、図-4に示す2011年9月3日の出水により再び淵は消失した。

次に、弁天淵の変遷について考察する。図-5は、(a) 1976年から(d) 2012年までの弁天淵周辺の航空写真を示したものである。図-5(a)より、弁天淵が存在していた1970年代まで、矢田川の主流は椎ヶ淵から弁天淵に向け左岸側に寄った流れとなっていた。しかしながら、1994年の図-5(c)を見ると、左岸側には土砂が堆積し、淵が消失していることが分かる。そして、図-5(d)の2012年、主流は右岸に沿った流れとなっている。この1976年から1994年の間における周辺環境の変化として、1980年の図-5(b)を見ると、椎ヶ淵上流部に、図-5(a)では見られない大野井堰が設置されている。大野井堰の正確な設置時期は確認できなかったものの、井堰の設置以降、淵が消失していたことが確認された。

淵の消失原因としては、前章で示した、河川改修に伴う流況の平滑化による影響や、図-1に示す入江ダムの竣工(1958年)による影響等も考えられる。しかしながら、入江ダム竣工後の約20年間、弁天淵は存在していた。一方、井堰のような河川横断工作物は、土砂動態等の周辺環境に与える影響が大きい⁹⁾。さらに、地元住民の方々からも、大野井堰の設置以降、淵が消失したとの声が聞かれた。したがって、ここでは、大野井堰の設置が弁天淵消失の最大の原因ではないかと推察された。そこで、次章以降、弁天淵に対する井堰設置の影響について、平面2次元の河床変動解析により検討していく。

3. 数値解析モデル

(1) 基礎方程式

本解析モデルでは、流れ場の計算にデカルト座標系における平面2次元浅水方程式を使用し、基礎方程式にはFAVOR法^{6),7)}を導入した。乱流モデルには0方程式モデルを採用した。河床近傍流速は、水深平均流速の流線の曲率より算定し、係数値はEngelund⁸⁾に従い7.0とした。

河床変動計算⁷⁾では、一様粒径の掃流砂のみを考慮した。掃流砂量は、河床の局所勾配の影響を考慮した芦田・道上式より算定し、x方向およびy方向流砂量は芦田・江頭・劉の方法⁹⁾により求めた。

(2) 数値計算法

本解析モデルでは、計算格子にレギュラー格子を採用し、浅水方程式の移流項の差分、および河床位方程式の空間差分に、5次精度WENO法^{6),7)}を適用した。詳細は参考文献^{6),7)}を参照されたい。ただし、文献6)に示される従来の手法で現地河床形状を対象に流れ場を計算した場

図-6 流束分離手法修正後における側壁近傍の流況

合、河床位が大きく変化する側壁近傍で問題が生じた。そこで、本研究では以下のような修正を施した。

まず、従来の手法について、運動方程式のx方向流束Eのみを対象に説明する。レギュラー格子上でWENO法を適用する場合、まず、各格子点で定義される E_i を E_i^+ と E_i^- に分離する。分離手法にはLax-Friedrich分離を用いる。

$$E_i = E_i^+ + E_i^- \quad (1)$$

$$E_i^\pm = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} uM \\ uN \end{pmatrix}_i \pm \alpha \begin{pmatrix} M \\ N \end{pmatrix}_i \right] \quad (2)$$

$$\alpha = \max |u| \quad (3)$$

ここに、 i : 格子中央で定義されるx方向格子番号、 u : x方向の水深平均流速、 (M, N) : (x, y) 方向の流量フラックス、 α : 全計算領域において絶対値で最大の u である。

分離した $E_i^\pm$ を用いて、WENO法により格子境界上の数値流速 $\tilde{E}_{i+1/2}$ を求め計算を進めていく。この手法を現地河床に適用すると、図-6に示すように、側壁近傍で河床位が横断(y)方向に急激に変化する場合、または流下(x)方向に河床位が上昇する場合に、側壁近傍流速が極端に大きく計算された。この極端に大きく計算された流速は、河床変動計算時に、側壁近傍の河床に振動を発生させてしまう。そこで、側壁近傍で数値流速 $\tilde{E}_{i+1/2}$ を求める際、つまり、 $i-1$ あるいは $i+2$ が壁面となる場合には、Lax-Friedrich分離に以下のような修正を施した。

$$E_i^\pm = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} uM \\ uN \end{pmatrix}_i \pm \alpha_* \begin{pmatrix} u_i h_* \\ v_i h_* \end{pmatrix} \right] \quad (4)$$

$$h_* = \min(h_i, h_{i+1}) \quad (5)$$

$$\alpha_* = \max |M_i/h_*| \quad (i = i-1 \sim i+2) \quad (6)$$

ここに、 v : y方向の水深平均流速、 α_* : $i-1$ から $i+2$ の範囲において絶対値で最大の M/h_* である。

図-6は修正適用後の流速分布を示している。図より、側壁近傍流速が極端に大きく計算されることはなく、流れが滑らかに再現されている。この手法は、平坦河床において横断方向に水深が大きく変動する様な流れ場⁶⁾にも適用できることを確認している。

(3) 境界条件およびその他の条件

計算領域は、図-2に示した東西500m、南北1000mの領域である。ただし、弁天淵下流部河道の弯曲は緩やかであるため下流端は直線河道とみなし、実計算上100mの整流区間を設けた。境界条件として、上流端では流量お

表-1 計算Caseと計算条件

計算Case	河床の状況	井堰の有無	流量 (m ³ /s)
Case1	1-1 砂州有り (2013年河床)	有り	12 (0.15)
	1-2 固定床		400 (5.12)
Case2	2-1 砂州無し	有り	400 (5.12)
	2-2 移動床 (河床材料 $d_m = 63.9 \text{ mm}$)	無し	

$\Delta t = 0.05 \text{ sec}$, $\Delta x = \Delta y = 2.0 \text{ m}$, マニングの粗度係数 $n = 0.036$
 ※ 流量()内の値は幸谷川流量を示す

図-7 各計算Caseにおける河床形状

よび平衡流砂量を, 下流端では等流水深を与えた. 側壁ではslip条件とした. 初期条件として, 無水状態の河道に上流端から通水し, 徐々に所定の流量に上げていった. 井堰の取扱い, 井堰をそれ以上河床位が低下しない固定床とし, 堰直上流での河床位が堰高よりも高くなると流砂が発生するものとした. 堰上での流砂量は, 格子内に存在する土砂量以上の流砂は発生しないものとした.

4. 現在の流況と井堰の有無による河床変動解析

(1) 計算Caseと計算条件

表-1に, 計算Caseと計算条件を示す. まず, 弁天淵周辺では水位観測等が行われていないため, 出水時の流況が不明である. そこで, Case1では流況を確認するため, 図-7(a)に示す2013年現在の河床形状を対象に流れのみを検討した. 流量は平水流量12m³/s (Case1-1), および2011年9月3日の出水時流量400m³/s (Case1-2)を一定流量として与えた. 一方, Case2では, 大野井堰の有無による井堰下流部の河床変動を検討するため, 2010年の実験的工事を想定し, 図-7(b)に示すように弁天岩上流部左岸の砂州を除去した状態を初期河床とした. Case2-1では井堰を固定床とし, Case2-2では井堰を撤去したものと考え, 井堰を土砂で構成される移動床として扱った. Case2-2で井堰を完全に撤去しなかった理由は, 井堰設置以前の河床形状が不明であること, およびCase2-1と2-2で初期流況が同一の下で河床変動を比較するためである. 流量は両者とも400m³/sの一定流量とした. ここで, 2011年9月3日洪水の実際の継続時間は流量100m³/s以上で50時間であったが, 計算では一定流量の下, 流れが定常状態となってから48時間の河床変動計算を行った. 粗度係数は河床勾配1/380よりBrayの式¹⁰⁾から決定した.

図-8 Case1-1における流況
(左: 水面形鳥瞰図, 右: 水深平均流速ベクトル図) 図-9 Case1-2における流況
(左: 水面形鳥瞰図, 右: 水深平均流速ベクトル図)

(2) 現在の流況について

図-8および図-9に, Case1-1およびCase1-2における水面形鳥瞰図および水深平均流速ベクトル図(流速コンター図)をそれぞれ示す. まず, 図-8より, 平水時には図-5(d)と同様, 主流は椎ヶ淵から弁天岩に向けて右岸に沿って流れる様子が再現できており, モデルの妥当性が伺える. 次に, 図-9より, 流量400m³/sの出水時には, 弁天岩上流の砂州も水没している. 流速コンター図を見ると, 主流は平水時と同様, 弯曲部右岸に沿って流れている. ここで, 粒径63.9mmとして無次元限界掃流力 τ_* を算定した場合, 全領域で τ_* は0.05以上となり, 活発な土砂移動が発生する状況であった. したがって, 河床変動としては弯曲部外岸(右岸側)で洗掘, 内岸(左岸側)で堆積が発生することが予想される. すなわち, 既に左岸側で土砂が堆積している2013年現在の河床では, 流量400m³/s程度では大きな河床変動は発生しない, あるいは左岸側で更なる土砂堆積が進行する恐れがある.

(3) 大野井堰の有無による河床変動への影響について

図-10および図-11に, Case2-1およびCase2-2における河床変動開始から(a)6時間後, (b)24時間後, および(c)48時間後の初期河床からの河床変動量コンターおよび平面流速ベクトル図(流速コンター図)をそれぞれ示す. まず, 井堰を考慮した図-10の河床変動量を見ると,

(a) 6時間後

(b) 24時間後

(c) 48時間後

図-10 Case2-1: 井堰有りににおける計算結果
(左: 河床変動量, 右: 水深平均流速ベクトル図)

時間の経過とともに、椎ヶ淵から弁天岩に向けて右岸側では洗掘が発生し、左岸側では土砂が堆積していく様子が分かる。これは、2013年現在の状況に似ている。流速コンター図を見ると、井堰上流では右岸側に流れが集中しているのに対し、井堰直下流からは左岸側に流れが集中している。その強い流れは椎ヶ淵に衝突することなく流下し、時間の経過とともに、椎ヶ淵から弁天岩に向けて弯曲部右岸側に集中していく様子が分かる。

一方、井堰を移動床とした図-11の河床変動量を見ると、6時間後の状況はCase2-1とは異なり、椎ヶ淵直下流の右岸側により大きな堆積域が形成されている。その堆積域は時間の経過とともに下流へと伸長し、同時に左岸

(a) 6時間後

(b) 24時間後

(c) 48時間後

図-11 Case2-2: 井堰無しにおける計算結果
(左: 河床変動量, 右: 水深平均流速ベクトル図)

側では椎ヶ淵から弁天岩に向けて湍筋が形成されている。これは、井堰設置以前の状況に近い。椎ヶ淵上流では、右岸側で洗掘、左岸側で堆積が進行している。流速コンター図を見ると、6時間後の流れは弯曲河道の右岸側に沿って流れている。その流れは時間の経過とともに、椎ヶ淵から左岸方向へと曲げられている様子が分かる。

ここで、両Caseとも24時間後までは弁天岩周辺の河床変動量に大きな違いはない。これは、初期流況が同一であること、また、弁天岩周辺の流れは常流であり、上流部での河床変動が影響しなかったためである。また、図-11(c)では弁天岩上流で堆積が進行しているが、これは、椎ヶ淵上流部で洗掘された土砂が、椎ヶ淵からの強い流

図-12 Case2-1：48時間後の水深平均流速ベクトル図

図-13 Case2-2：48時間後の水深平均流速ベクトル図

れにより弁天岩前面まで輸送されたためと考えられる。

図-12および図-13は、Case2-1およびCase2-2における河床変動開始から48時間後の流速ベクトル図（流速コンター図）を拡大して表示したものである。図-12より、井堰直上流では、右岸側に集中していた流れが河川横断方向に平滑化されており、また、井堰から左岸側に集中した流れが発生している。一方、図-13を見ると、椎ヶ淵上流の流れは、河道の弯曲に沿って右岸側に集中しており、その流れが椎ヶ淵の大岩に衝突後、強制的に左岸方向へと曲げられている様子が分かる。

以上より、弁天淵消失のメカニズムとして以下のことが考えられる。まず、大野井堰設置以前、流れは椎ヶ淵直上流まで右岸側に集中していた。その強い流れが椎ヶ淵の大岩に衝突し、椎ヶ淵から弁天岩に向けて左岸側に沿った流れとなっていた。その流れが弁天岩前面に流入し、局所洗掘を発生させ、弁天淵を形成していた。しかしながら、大野井堰設置以降、井堰周辺では河川横断方向に流れが平滑化され、椎ヶ淵の大岩に衝突する流れが弱くなった。特に、井堰を通過する主流は左岸側に集中し、椎ヶ淵の大岩に衝突することなく、椎ヶ淵から弁天岩に向けて右岸に沿った流れとなった。さらに、弯曲河道であることから、内岸にあたる左岸側では土砂堆積が進行した。結果、弁天淵は埋没し、消失したものと考えられる。したがって、弁天淵消失の原因として、大野井堰の設置が最大の原因であると考えられる。ただし、井堰直上流で流れが左岸側に集中する原因は解明できていない。この点については、今後の検討課題である。

5. おわりに

本研究では、兵庫県北部を流れる矢田川の弁天淵を対象とし、淵の消失原因およびそのメカニズムの究明を試みた。まず、航空写真の比較および地元住民の意見から、大野井堰の設置が弁天淵消失に大きく影響していることが推察された。そこで、井堰の有無による河床変動解析を試みた。結果、井堰の設置により、堰設置以前とは流

れおよび河床変動が大きく変化していることが確認でき、井堰の設置が弁天淵消失の最大の原因の1つであることがほぼ特定された。さらに、弁天淵が形成されていたメカニズム、および消失したメカニズムを明らかにした。

ただし、弁天淵周辺の流れは常流であり、淵消失には下流域の影響も考えられる。また、井堰上流で流れが左岸に集中する原因は未解明であり、今後も検討を要する。

謝辞：本研究は、公益財団法人河川財団の河川整備基金助成事業によって実施した。また、兵庫県但馬県民局新温泉土木事務所河川砂防課からは、航空写真及び水位データを御提供頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 兵庫県：矢田川水系河川整備計画, 2012.
- 2) 清水義彦, 小葉竹重機, 小林俊雄, 長田健吾, 中村佳央, 宮前太一：山地河川における瀬淵復元のための実験工事とその効果予測, 河川技術論文集, 第10巻, pp.411-416, 2004.
- 3) 眞間修一, 古村幸三, 堀江史生, 坂之井和之, 中西宣敬, 浜野直樹：安室川自然再生における土砂動態の活性化による瀬・淵形成の可能性検討, 河川技術論文集, 第15巻, pp.213-218, 2009.
- 4) 福留脩文, 藤田真二, 福岡捷二：淵環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価, 水工学論文集, 第54巻, pp.1267-1272, 2010.
- 5) 田中倫之, 知花武佳, 辻本哲郎：秋川における瀬・淵の変質パターンの解明～漁業関係者の認識を通して～, 河川技術論文集, 第9巻, pp.427-432, 2003.
- 6) 梶川勇樹, 檜谷治：WENO法を用いた平面2次元浅水流モデルの開発, 土木学会論文集B1(水工学), 第69巻, 4号, pp.1_631-636, 2013.
- 7) Kajiawa, Y. and Hinokidani, O.: Numerical simulation of 2-D bed deformation in a slit sabo dam, Proceedings of 35th IAHR World congress, USB, Theme C, A11452, 2013.
- 8) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 100, No. 11, 1974.
- 9) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義：蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 第35巻, pp.383-390, 1991.
- 10) Bray, D.: Estimating Average Velocity in Gravel-Bed Rivers, *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 105, No.HY9, pp.1103-1122, 1979.