

ベーン工付き取水口周辺の三次元河床変動解析

Three dimensional simulation of sediment transport around water intake with vane

○ 太田 一行, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, k-ota@criepi.denken.or.jp
佐藤 隆宏, 電中研, 同上 1646, t-sato@criepi.denken.or.jp

Submerged vane is used in preventing excessive bed-sediment ingestion into lateral diversions of flow from alluvial channels. In order to examine the effect of vane from the hydrodynamic viewpoint, this study conducts 3D numerical simulation of sediment transport around submerged vane placed at diversion entrance. The numerical simulation is conducted using RANS solver coupled with Lagrangian-Eulerian model of sediment transport. Laboratory experiments of diversion entrance with and without vane were reproduced by the numerical simulation. The numerical results showed satisfactory agreement with the experimental result. The mechanism of the effect of vane is discussed through the numerical results.

1. はじめに

河川から発電用に取水する場合、河川内の流砂が取水路にしばしば侵入し、水車またはポンプの損傷を引き起こし、発電効率の低下を招く。この対策として米国の火力発電所では、取水口の周辺に複数のベーン工を設置し、水と流砂の分派を生じさせることで、取水路への流砂侵入を軽減している事例がある(Odgaard, 2009)。ベーン工の基本的な機構として、底面付近の掃流砂・浮遊砂を取水路の対岸方向に向けることで、取水路への土砂流入量を軽減できることが既往の水理実験により知られている(Barkdoll et al, 1999)。しかし、流れ構造および流砂運動の観点からの知見は不足している。本研究では、三次元河床変動解析によって、ベーン工付き取水口周辺での三次元流れおよび河床変動特性を検討する。

2. 解析方法

(1) 自由水面流れ

本研究では流体の運動方程式としてレイノルズ平均方程式(RANS)を用いる。また、堆積土砂をポーラス法により模擬する。流れの基礎式は以下のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda \rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda \rho u_i u_j) = -\lambda \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \lambda \rho g_i - \alpha \frac{(1-\lambda)^3}{\lambda} \frac{\mu}{d_{50}^2} u_i \quad (2)$$

ここで、 u_i : 流速ベクトル, ρ : 流体密度, p : 圧力, g_i : 重力加速度ベクトル, μ : 流体の粘性係数, μ_t : 渦粘性係数, λ : 計算セルにおける空隙率である。右辺最終項は、ダルシー則による層流抵抗を意味する。乱流モデルには、 $k-\omega$ SST モデルを用いる。流速の境界条件については、VOF 法とポーラス法を用いているため、水面と河床には設定不要であり、水路側壁についてはスリップ条件を課した。なお、一連の流体解析は、オープンソース

流体解析ライブラリ OpenFOAM を改変したものである (Ota et al, 2017)。

(2) 掃流砂の離脱・運動・浮遊・堆積

粒径階毎の pick-up 量は、局所勾配の影響を考慮した中川ら(1985)の式を用いて以下のように算出される。

$$V_p = (1 - \lambda_b) dp_s S_b \quad (3)$$

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\rho_s/\rho - 1)g}} = 0.03 G_* \tau_* \left(1 - \frac{0.7 \phi \tau_{*c}}{\tau_*} \right)^3 \quad (4)$$

ここに、 V_p : 計算メッシュから単位時間当たりに離脱する土砂体積, λ_b : 土砂の空隙率, d : 河床材料の粒径, p_s : pick-up rate, S_b : 河床境界の格子面積, ρ_s : 土粒子の密度, G_* : 流砂の移動方向に関する関数, ϕ : 限界掃流力の補正関数, τ_* , τ_{*c} : それぞれ粒径毎の掃流力, 限界掃流力である。掃流力については、砂面付近の流速絶対値および等価粗度係数 $k_s = 2.5d$ を用いて、対数則により粒径毎に評価する。

離脱した掃流砂群の位置は、粒径階毎に以下のように算出される。

$$p_{sed,j} = \int u_{sed,j} dt \quad (5)$$

$$s_{sed} = \int |u_{sed}| dt \quad (6)$$

ここで、下付文字 j ($=1, 2$) は河床との接線方向を示す。 p_{sed} : 掃流砂群の位置, s_{sed} : pick-up した掃流砂の累積移動距離, u_{sed} : 掃流砂パーセルの移動速度 (砂面と平行な 2 方向ベクトル) である。 u_{sed} は掃流砂の運動方程式により、以下のように表される。

$$\rho \left(\frac{\rho_s}{\rho} + C_M \right) \frac{\pi d^3}{6} \frac{\partial u_{sed,j}}{\partial t} = Dr_j + W_j - F_j \quad (7)$$

ここで、 Dr , W , F はそれぞれ、抗力項, 重力項, 摩擦力項であり、各項の式については既往文献(Ota et al., 2017)を参照されたい。 u_{sed} の時間積分には 2 階ルンゲクッタ法を用いる。

掃流砂の堆積量は、以下のように算出される。

$$V_d^{(n)} = V_p F_s^{(n)} (1 - F_t^{(n)}) \quad (8)$$

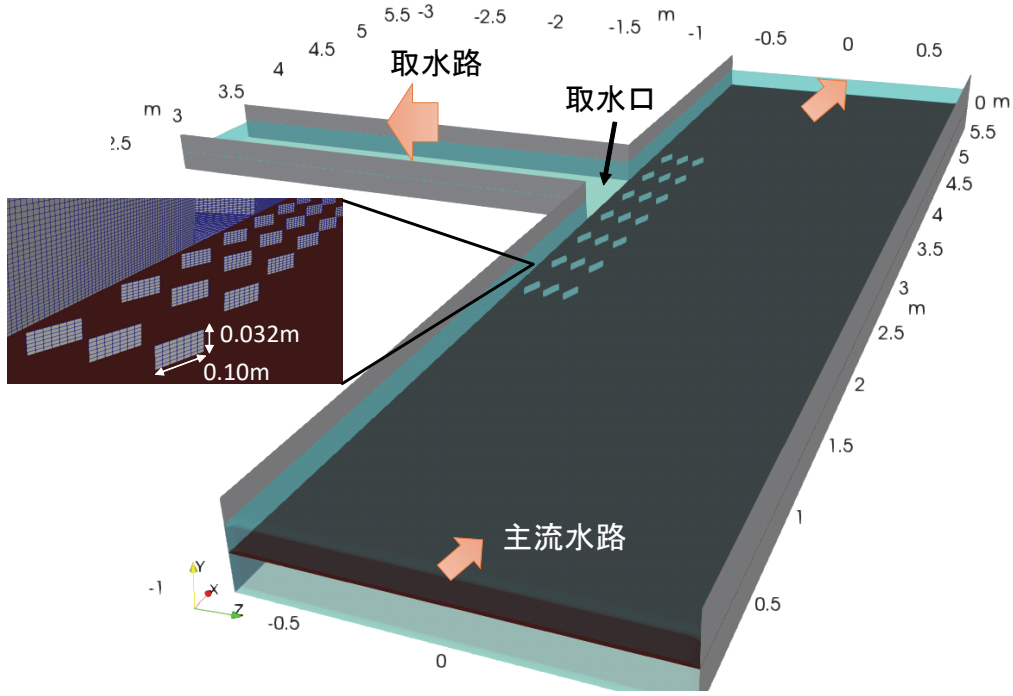


Fig. 1 ベーン工有りの条件における計算領域

$$F_s^{(n)} = f_s(s^{(n)})\Delta s \quad (9)$$

$$\text{with } f_s(s^{(n)}) = \frac{1}{\Lambda} \exp\left(-\frac{s^{(n)}}{\Lambda}\right) \quad (10)$$

$$s^{(n)} = \sum |U_{sed}| \Delta t \quad (11)$$

ここで、 f_s は堆積の確率密度関数、 Λ ：平均 step-length である。
 Λ については、Armanini et al. (2015)の次式を用いる。

$$\frac{\Lambda}{d} = \frac{K_1}{1 + K_2/\tau_*} \quad (12)$$

ここで、 K_1, K_2 は定数であり、 $K_1 = 20 \sim 250$, $K_2 = 1 \sim 7$ とされるが、本研究では $K_1 = 150$, $K_2 = 1$ を用いた。 $F^{(n)}$ ：離脱から n ステップの間で掃流砂が浮遊砂に遷移する確率である。掃流砂が浮遊砂に遷移する確率 $F^{(n)}$ については、Garcia and Parker (1991)の巻き上げ速度式を援用して以下のように算出する。

$$F_t^{(n)} = \frac{V_{sus}^{(n)}}{V_p(1 - F_s^{(n)})} \quad (13)$$

$$V_{sus}^{(n)} = \min\left(\frac{\alpha Z_m^5 S_b |w_s|}{1 + \frac{\alpha}{0.3} Z_m^5}, V_{rem}^{(n)}\right) \quad (14)$$

$$Z_m = \frac{u_*}{|w_{s,j}|} R_p^{0.6} \quad \text{with } R_p = \frac{\sqrt{sgd^3}}{\nu} \quad (15)$$

ここに、 $\alpha = 1.3 \times 10^{-7}$, $w_{s,j}$ は粒子の沈降速度ベクトル、 V_{rem} は追跡中の掃流砂群の残余量を時間間隔で除した量であり、浮上量は掃流砂量に制約されることになる。掃流砂の追跡は、離脱した全ての掃流砂が堆積または浮遊するまで行われる。

(3) 浮遊砂の移流・拡散・沈降

浮遊砂の挙動は、移流・拡散・浮上・沈降を考慮した次式により計算する。

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j - w_{s,j}) C_s = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + v_t) \frac{\partial C_s}{\partial x_j} \right) + \frac{V_{sus}}{S_b} - C_b w_s \quad (16)$$

ここに、 C_b は基準面濃度高さにおいて推定される浮遊砂濃度であり、河床直上の計算格子から局所平衡の仮定を用いて算出する。

(4) 河床高の変動

離脱からの時間ステップ ($n=1 \sim N$) 毎に分割された堆積量 $V_d^{(n)}$ を集積し、離脱量との差分を取った次式により河床変動量が算出される

$$(1 - \lambda_b) \frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{\sum_{n=1}^N V_d^{(n)} - V_p}{S_b} \quad (17)$$

ここに、 z_b ：河床高である。なお、本解析モデルでは一様粒径を扱うことから、河床⇄掃流砂、掃流砂⇄浮遊砂の交換が表現される。このため、式(17)に浮遊砂は含まれていない。

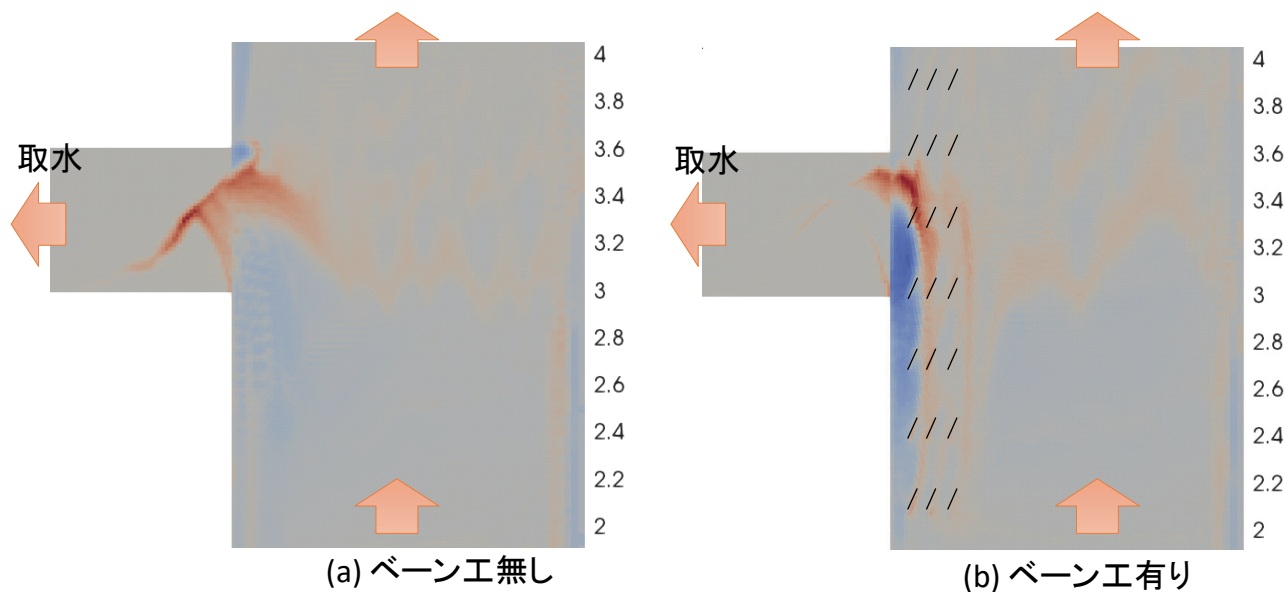


Fig. 2 河床変動量の解析結果 ($t=20\text{min}$)

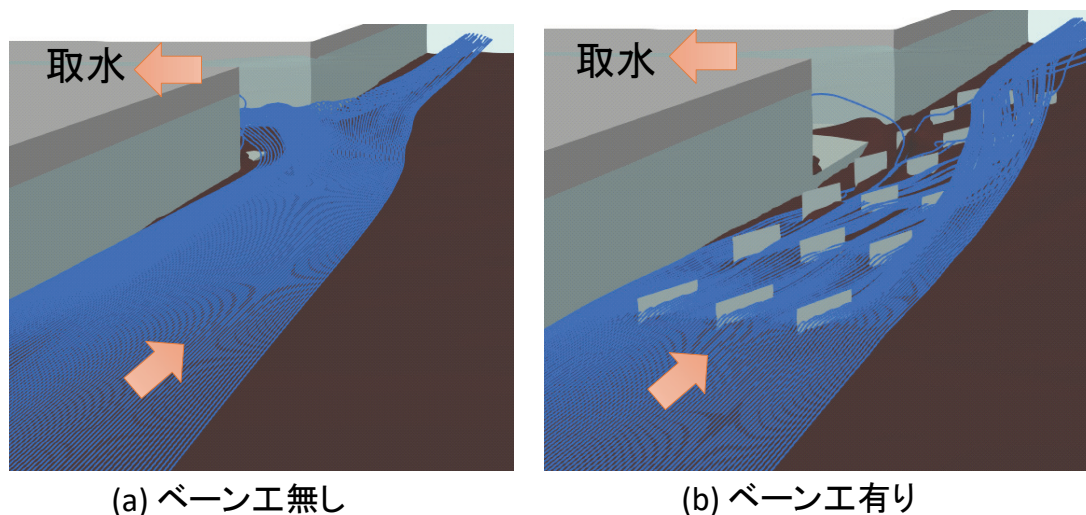


Fig. 3 河床形状, 水面, 河床付近流線の可視化($t=20\text{min}$)

3. 解析結果および考察

Barkdoll らは、主流水路幅 1.5m, 取水路幅 0.6m の水路模型を用いて、ベーン工および補助構造物を付属した取水口周辺の移動床実験を行っている。河川流量および取水流量をそれぞれポンプで制御することで、流量の分派率の異なる条件下で実験を行っている。いずれの実験でも河床砂には $d = 0.9\text{mm}$ の一様粒径が用いられており、上流端からの給砂はなされていない。平衡状態に達した後 (通水 2 時間後) に単位幅流砂量の分派率を計測し、一部の実験ケースで平衡状態での地形・流速分布を計測している。単位幅流量の分派率 q_r は、主流水路上流の単位幅流入流量に対する取水

路内の単位幅流量で定義される。本研究ではベーン工の有無の違いが大きいとされる $q_r = 0.25$ の条件を対象に、ベーン工の有り・無しの 2 通りの再現解析を行う。Fig. 1 はベーン工有りの条件における領域を示す。初期において主流水路にのみ土砂が設置されており、取水路内は固定床であり、主流水路の初期河床位と取水路内はの固定床位は同じである。取水路周辺には、ベーン工 (長さ 0.1m) が 3 列に渡って水路底から設置されており、ベーン工天端は初期堆砂位よりも 3.2cm 高い状態にある。計算格子は 6 面体格子とし、ベーン工は不透過の内部壁として設定した。流入流量は $0.104\text{m}^3/\text{s}$ であり、流入部付近の水深は 0.15m である。

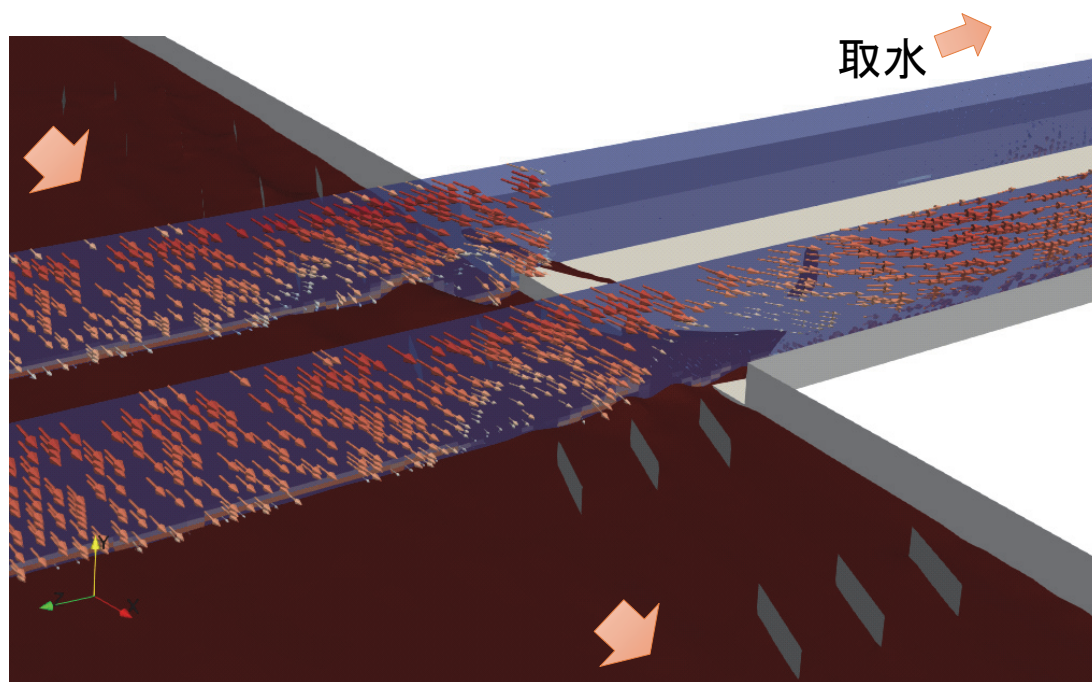


Fig. 4 取水路内の側壁付近の流速ベクトルおよび浮遊砂濃度の可視化（べん工有り， $t=20\text{min}$ ）

Fig. 2 は， $t = 20\text{min}$ における河床変動量である。いずれのケースでも，主流水路内には波高 1~2cm の dune が生じており，取水路内では堆砂が認められる。また，べん工有りの場合，最左岸のべん工周辺において局所洗掘が生じている。べん工有りでは局所洗掘によって取水口周辺で土砂巻き上げが生じているが，取水路内の堆砂量は，べん工無しに比べて小さい。Fig. 3 は，同時刻における河床形状，水面，河床付近の流線を可視化したものである。べん工無しの場合，流線は取水路内に流入しているが，べん工有りの場合は流線は取水口対岸に向かいながら流下している様子が分かる。従って，べん工有りの場合は，べん工によって底面付近の流れが取水口の対岸方向に向かうことで，流砂が取水口に入りにくくなっている。Barkdoll らの実験によると， $q_r < 0.2$ の条件では取水路への土砂流入がほぼ完全に遮断され， $q_r > 0.2$ ではべん工周辺の渦流によって巻き上げられた土砂が取水路に流入するとされている。本研究では， $q_r = 0.25$ を対象としたため，べん工周辺の局所洗掘によって巻き上げられた土砂が取水路に流入している。

Fig. 4 は，べん工有りの場合において，取水路内の側壁付近の流速ベクトルおよび浮遊砂濃度を可視化したものである。べん工天端は，取水路の水深 0.15m の 2 割程度の高さであるため，取水路に流入する流れの大部分には影響しておらず，浮遊砂を伴う河床付近の流れのみに影響している。これは，取水口周辺で顕著な損失を与えていないことを意味し，発電用利水において重要な意味を持つ。なお，取水口流入した流れは，取水路の右岸側を流れている。これは Barkdoll らの実験では主流水路の流速が比較的大きいため，直角分岐によって右岸側に偏流しているためである。このように偏流する状況においては，取水口を部分的に拡幅

することで，べん工の効果を更に高めることができるとされている。

4. おわりに

本研究では，掃流砂・浮遊砂の非平衡運動を考慮した三次元河床変動解析によって，取水口周辺に設置されるべん工の機構について検討した。解析ケース数は少ないものの，既往の水理実験において示されたべん工の機構・効果を数値解析により確認した。今後，水理実験結果との詳細な比較検証を通じて，べん工の効果を高めるための考察を行う。

参考文献

- (1) Odgaard, A. J. River training and sediment management with submerged vanes. American Society of Civil Engineers, 2009.
- (2) Barkdoll, B. D., Ettema, R., and Odgaard, A. J., "Sediment control at lateral diversions: limits and enhancements to vane use", J. Hydraul. Eng., (1999), 125(8), 862-870.
- (3) Ota, K., Sato, T., and Nakagawa, H.: Quantification of spatial lag effect on sediment transport around a hydraulic structure using Eulerian-Lagrangian model., Adv. Wat. Eesour., (2017).
- (4) 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾: 側岸における非平衡流砂過程, 第 29 回水理講演会論文集, (1985), pp.561-566.
- (5) Armanini, A., Cavedon, V., and Righetti, M. A probabilistic/deterministic approach for the prediction of the sediment transport rate. Adv. Wat. Res., (2015), 81, 10-18.
- (6) Garcia, M., and Parker, G. Entrainment of bed sediment into suspension. J. Hydraul. Eng., (1991), 117(4), 414-435.