

# 船底形河道における低水路と高水敷の境界付近での細粒土砂の堆積機構 Sedimentation mechanism of fine sediment near the boundary between low water channel and high water channel in the ship-bottom-shaped channel

17D3101003B 長谷部 夏希 (河川工学研究室)  
Natsuki HASEBE / River Engineering Lab.

**Key Words :** ship-bottom-shaped channel, sedimentation mechanism, suspended load, secondary flow

## 1. 序論

遠賀川では流下能力の向上のため、高水敷を緩傾斜化した船底形河道への改修が進められている(図-1)。船底形断面形は、低水路と高水敷の境界形状が連続的に変化するため(図-2)、治水だけではなく環境、景観の面からも優れた断面形であると言われている<sup>1)</sup>。一方で、蛇行している船底形河道の低水路と高水敷の境界付近には、細粒土砂が堆積し易く(図-2)、河積の減少や高水敷の樹林化などが懸念されている。そのため、堆積の生じにくい船底形河道の設計法の確立が求められている。

本研究では、平成30年7月洪水において船底形河道の河岸付近での土砂堆積が見られた遠賀川の赤地地区(図-1)を対象とし、準三次元洪水流解析法と新たに構築した浮遊砂の解析法により、船底形河道における流れと河

床変動、低水路と高水敷の境界付近の細粒土砂の堆積機構を明らかにする。

## 2. 対象区間の概要

遠賀川では、平成21年から平成24年にかけて赤地地区(20.4km~22.6km)(図-1)の20.9km~21.6kmで複断面河道から船底形河道へ改修が行われた。船底形河道では低水路と高水敷の境界付近に細粒土砂の堆積が生じており、21.4km地点では、約90cmの堆積が生じている(図-2)。図-3は低水路と河岸際の高水敷の粒度分布を示している。低水路河床の $D_{50}$ は2~3mm程度の砂礫であるが、河岸際の堆積土砂は主に0.3mm程度の細砂であることが分かる。また、今回対象とした平成30年7月洪水は、船底形河道へ改修した後に発生した最大の洪水であり、基準点である日の出橋における最大流量は約4000 $m^3/s$ であった。

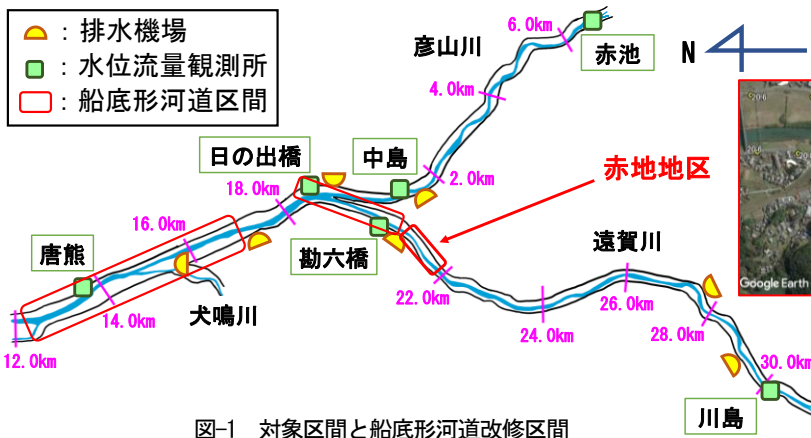


図-1 対象区間と船底形河道改修区間

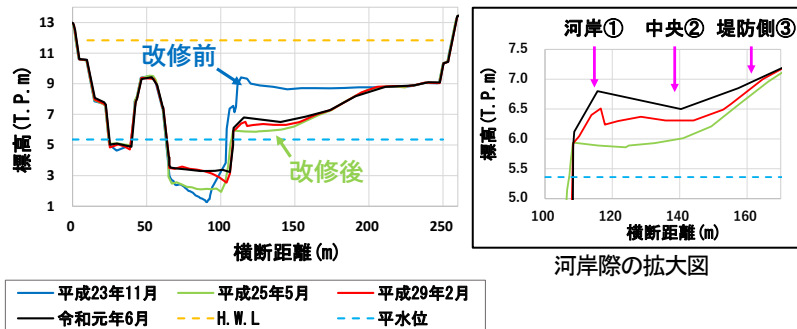


図-2 21.4km地点における改修前後の横断面形と河岸際の土砂堆積

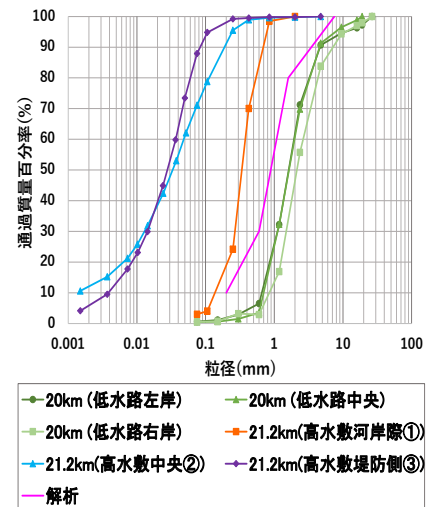


図-3 堆積土砂の粒度分布

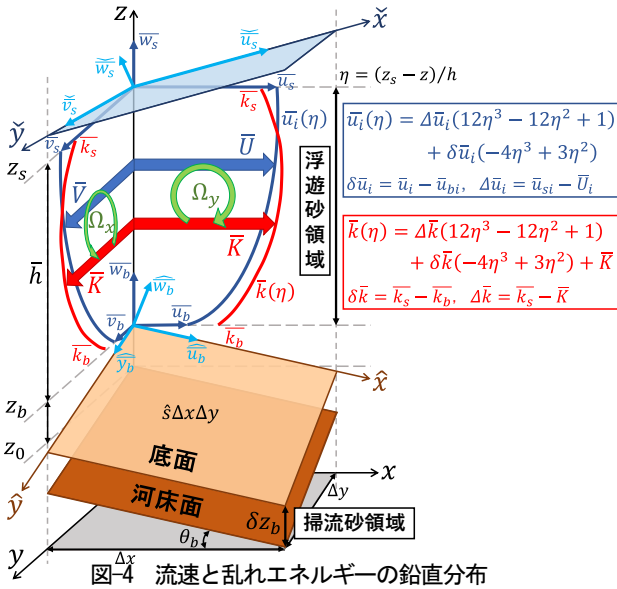


図4 流速と乱れエネルギーの鉛直分布

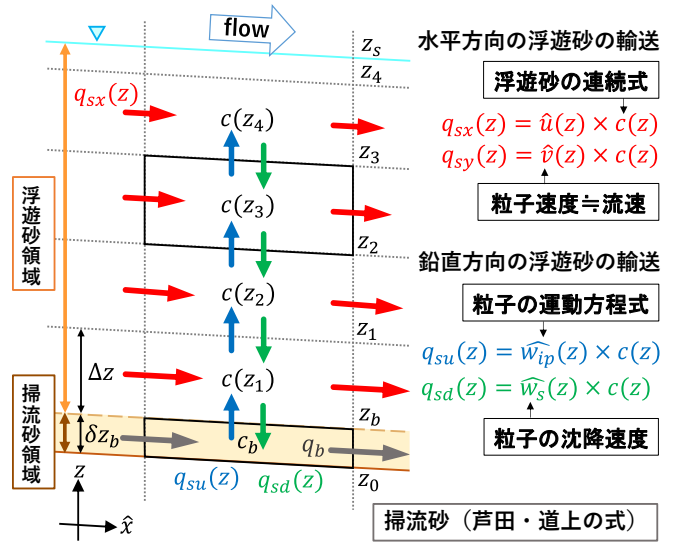


図5 河床変動解析の枠組

### 3. 解析方法

#### (1) 洪水流解析

図-4は本解析における流速と乱れエネルギーの鉛直分布を示している。洪水流の解析は、浅水流方程式と水深積分渦度方程式により流れの三次元性を解くことができるGBVC法(一般底面流速解析法)<sup>2)</sup>を用いた。以下に本解析で用いた連続式(式1)、運動方程式(式2)、渦度方程式(式3)を示す。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}\bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}\bar{V}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j \bar{h}}{\partial x_j} = -g \bar{h} \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{T}_{ij} \bar{h}}{\partial x_j} - \frac{\tau_{bi}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h \Omega_i}{\partial t} + \frac{\partial h \Omega_i U_j}{\partial x_j} - \frac{\partial h \Omega_j U_i}{\partial x_j} = D_i - \left( \nu_t \frac{\partial \omega_i}{\partial z} - \nu_t \frac{\partial \omega_i}{\partial x_j} \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \right)_b + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( h \nu_t \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

ここに、 $h$ ：水深、 $U, V$ ： $x, y$ 方向の水深平均流速、 $t$ ：時間、 $i, j = 1, 2$ 、 $g$ ：重力加速度、 $T_{ij}$ ：せん断応力、 $\tau_{bi}$ ：底面せん断応力、 $\rho$ ：水の密度、 $z_s$ ：基準面からの水位、 $\omega_i$ ：渦度、 $\Omega_i$ ：水深平均渦度、 $D_i$ ：渦度の輸送項、 $\nu_t$ ：渦動粘性係数である。また“ $\bar{\cdot}$ ”はレイノルズ平均値を表す。ただし、低水路と高水敷の境界付近における細粒土砂の堆積機構を明らかにするためには、二次流場と低水路と高水敷の境界付近での乱れ場を精度良く解析し、浮遊砂の巻き上げと河岸付近への輸送を見積もる必要がある。そのため、底面での乱れエネルギー輸送方程式(式4)を付加し、乱れの三次元分布、非平衡性を考慮した<sup>3)</sup>。

$$\frac{\partial k_b}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial k_b}{\partial x_j} = P_{kb} - C_d \frac{k_b^3}{l_d} + \frac{\nu_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k_b}{\partial x_j^2} + \frac{\dot{s}}{h^2} \frac{\nu_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k}{\partial \eta^2} \Big|_b \quad (4)$$

ここに、 $k_b$ ：底面の乱れエネルギー、 $u_{bi}$ ：底面流速、 $P_{kb}$ ：底面の乱れの生産項、 $l_d$ ：乱れのスケールである。乱れエネルギーは、渦動粘性係数として運動方程式のせん断応力項と渦度方程式の生産項に反映されている。

#### (2) 新たに構築した浮遊砂の解析法

浮遊砂の運動は図-5より、粒子の掃流砂層から浮遊砂領域への巻き上げ及び、浮遊砂領域内での鉛直上向き速度を乱れに起因する流体力項を考慮した粒子の運動方程式(式5)により解析した。

$$\begin{aligned} (\rho_s + C_M \rho) A_3 d_k^3 \frac{d \widehat{w}_{pk}}{dt} &= \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d_k^2 |\widehat{w} + \widehat{w}' - \widehat{w}_{pk}| (\widehat{u} + \widehat{u}' - \widehat{u}_{pk}) \\ &\quad + A_3 d_k^3 (\rho_s - \rho) g_z \cos \theta_b \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\rho_s$ ：砂粒子の密度、 $\rho$ ：水の密度、 $d$ ：粒径、 $A_2$ ：2次元の形状係数( $A_2 = \pi/4$ )、 $A_3$ ：3次元の形状係数( $A_3 = \pi/6$ )、 $\mathbf{u}_p$ ：砂粒子の速度、 $\mathbf{u}$ ：周囲流体流速、 $C_D$ ：抗力係数( $C_D = 0.4$ )、 $C_M$ ：付加質量係数( $C_M = 0.5$ )、 $g_z$ ：重力加速度である。“ $\widehat{\cdot}$ ”は底面に沿った座標系を表し、 $\widehat{w}_{pk}$ は底面に対し垂直な方向の速度である。流速の乱れ成分 $\widehat{u}_i'$ は、正規分布( $N(\sigma, \mu)$ 、 $\sigma = \sqrt{\overline{u_i' u_i'}}$ 、 $\mu = \bar{u}_i$ )に従うと仮定してランダムに与えた。ここで $\overline{u_i' u_i'}$ は乱れの等方性を仮定し、 $\overline{u_i' u_i'} = (2/3) \bar{k}$ により与えている。また、粒子の鉛直下向き速度はRubeyの沈降速度式を用い、水平方向速度は粒子は流れに追随するとして、各高さの流速とした。浮遊砂濃度分布は浮遊砂の三次元連続式(式6)により求めた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial c(z) u_p}{\partial x} + \frac{\partial c(z) v}{\partial y} + \frac{\partial c(z) w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

掃流砂の運動は、従来の芦田・道上の平衡流砂量式を用いて解析した。

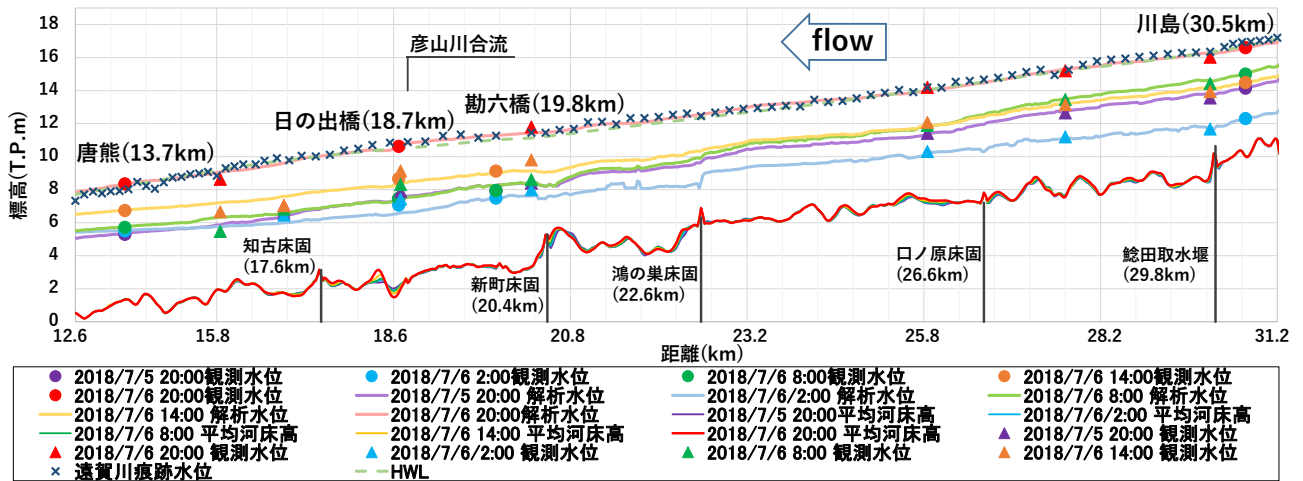


図-6 観測水面形と解析水面形の比較

### (3) 解析条件

本解析では、広域計算と詳細計算の二段階で解析を行っており、広域区間は唐熊(13.5km)～川島(30.5km)と彦山川の赤池(7.2km)とし、詳細区間は赤地地区(20.4km～22.6km)とした。広域計算では、全体の観測水面形と解析水面形が合致するように洪水流・河床変動解析を行い、広域の流れ場と河床変動、流量ハイドログラフを計算した。広域計算の上下流端境界条件は、川島・唐熊・赤池各地点の水位観測ハイドログラフを与えた。詳細計算では、広域解析により求めた水理量を詳細区間の上下流端境界条件として与えた。ここで、広域区間と詳細区間の格子解像度は、広域区間：流れ方向 25m×横断方向 8m、詳細区間：流れ方向 4m×横断方向 4mである。解析に用いた河床材料粒度分布は、図-3に示している。

### 4. 解析結果とその考察

図-6は洪水増水時の観測水面形と解析水面形の比較、図-7は日の出橋における観測流量と解析流量を示しており、解析結果は観測水面形および観測流量をほぼ再現している。図-8は洪水ピーク時の主流速コンターと底面流速ベクトルおよび流線を示している。船底形河道への改修を行った21.6km付近から右岸側の高水敷に主流が乗り上がっていることが分かる。図-9は21.2km横断における洪水ピーク時の、解析から求まる主流速と鉛直方向の流速コンターおよび二次流の解析結果を示している。図より、反時計回りの明確な二次流が生じていることが分かる。図-10は、洪水ピーク前の底面における解析浮遊砂濃度のコンターを示している。浮遊砂濃度は、船底形河道区間より上流側では低水路で濃度が高くなっている。しかし、21.6km付近から流れが高水敷に乗り上げる区間で低水路よりも高水敷で浮遊砂濃度が高くなっており、高水敷を中心に浮遊砂が輸送されて

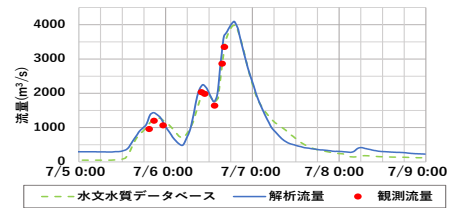


図-7 日の出橋における観測流量と解析流量の比較

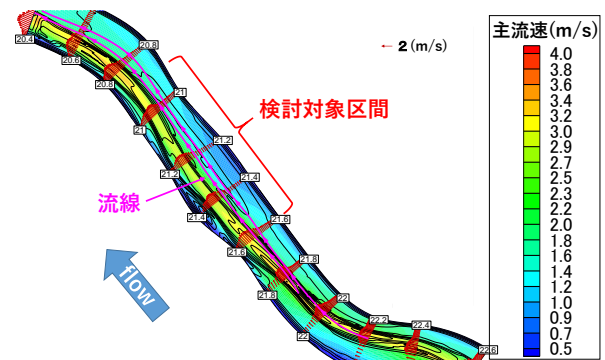


図-8 主流速コンター図(洪水ピーク時)

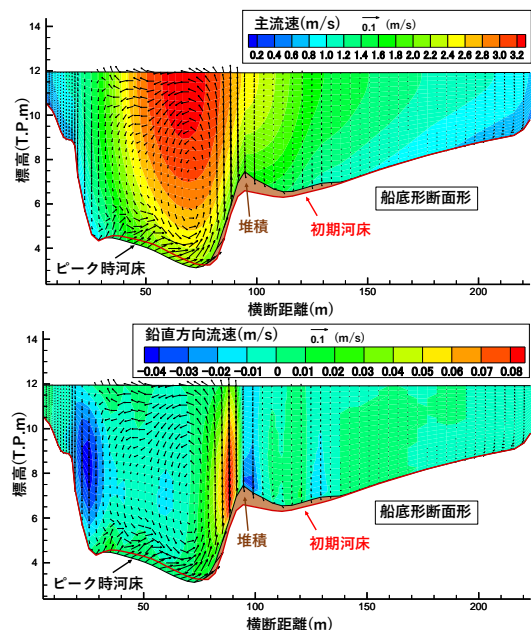


図-9 21.2km横断における二次流の解析結果(洪水ピーク時)

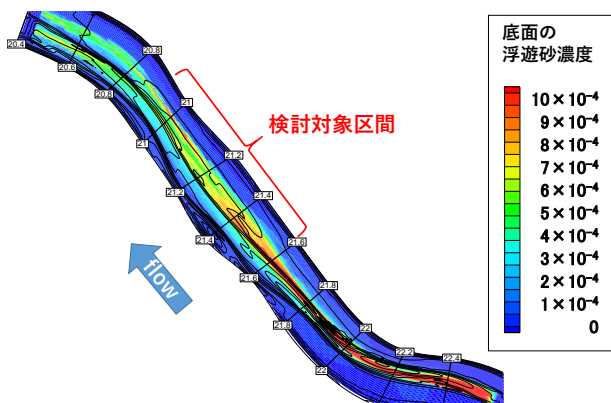


図-10 底面の解析浮遊砂濃度カウンター図(洪水ピーク前)

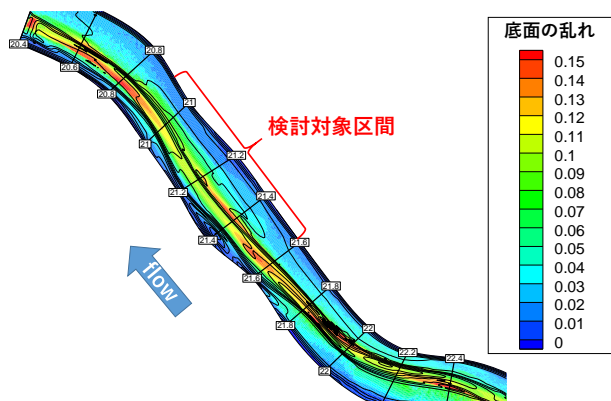


図-11 底面の乱れカウンター図(洪水ピーク前)

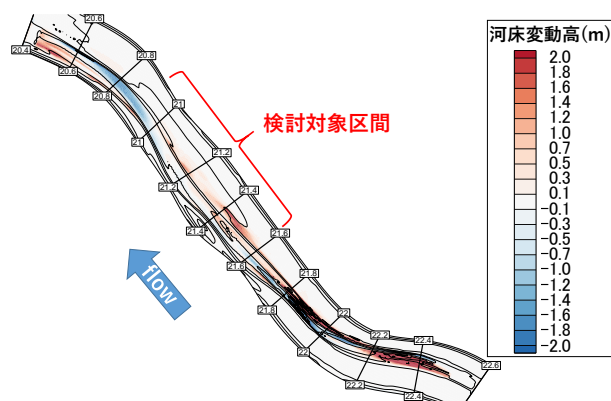


図-12 洪水前後の解析河床変動カウンター図

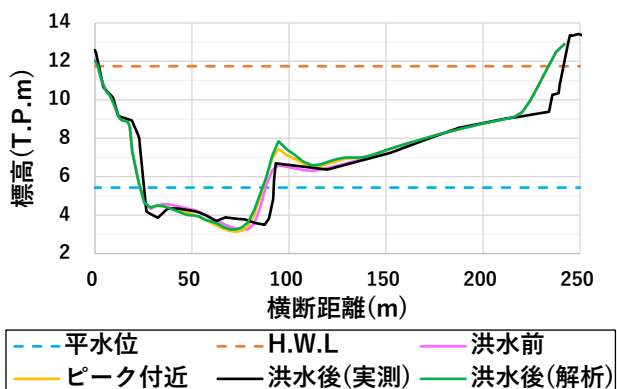


図-13 21.2km地点における実測と解析の横断面形の比較

いることが分かる。図-11は図-10と同時刻の底面における乱れのカウンター図を示している。底面の乱れは低水路だけではなく、細粒土砂の堆積がみられる河岸斜面付近においても大きくなっている。乱れが大きい場所では、その分大きな鉛直方向流速が発生するため、河岸付近の細粒土砂の舞い上がりが生じており、この機構を表現できている。図-12は洪水前後の解析河床変動カウンター図を示している。船底形河道区間においては、流れが高水敷に乗り上げている付近で土砂の堆積量が多くなっている。実測と解析結果の横断面形を比較すると(図-13)、解析結果は高水敷の河岸際に土砂が堆積する傾向を説明できているが、実測よりも堆積量がやや大きめに算定されている。以上の事実は、船底形河道が浮遊砂を舞い上げというよりも低水路曲率が二次流を引き起こし、二次流と乱れによって浮遊砂を巻き上げていることから、低水路曲率について十分な配慮が必要である。

## 5. まとめ

本解析法は底面での乱れの非平衡性を考慮することで、乱れの強さに応じた河岸斜面付近の浮遊砂の巻き上げ量を評価しており、船底形河道に改修した赤地地区における細粒土砂の堆積現象をほぼ説明することができた。すなわち、赤地地区の船底形河道は、洪水流に対する低水路線形の関係から、主流が高水敷に乗り上げ、さらに反時計回りの二次流の発達により、低水路と高水敷の境界付近に細粒土砂が輸送され、堆積が生じ易くなっていることが分かった。以上の考察より、高水敷際に堆積の生じにくい管理し易い船底形河道の設計を行うためには、河道断面形だけではなく低水路線形に対する流れと土砂輸送について十分に考慮する必要がある。

## 参考文献

- 1) 笹木拓真, 宮原幸嗣, 福岡捷二: 複断面から船底形河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化, 河川技術論文集, 第20巻, pp.277-282, 2014.
- 2) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 水工学論文集, 題56巻, I\_1225-I\_1230, 2012
- 3) Takahisa Gotoh, Shoji Fukuoka: Development of bed variation calculation method considering nonequilibrium sediment motion and interaction between bed load and suspension: application to river mouth sandbar with large-scale topographic changes due to flood, 22<sup>nd</sup> IAHR-APD Congress, 2020.