

掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う洪水流・河床変動解析法の構築と

昭和 56 年 8 月石狩川洪水への適用

Development of flood flow and riverbed variation analysis method that can calculate bed load and suspended load integrally and application to the Ishikari River flood in August 1981

- 長谷部夏希, 中央大学大学院 理工学研究科, 〒112-8551 東京都文京区春日一丁目 13-27
後藤岳久, 中央大学研究開発機構, 〒112-8551 東京都文京区春日一丁目 13-27
福岡捷二, 中央大学研究開発機構, 〒112-8551 東京都文京区春日一丁目 13-27

In this study, we developed the quasi-three-dimensional flood flow and riverbed variation analysis method that can calculate non-equilibrium motion of bed load and suspended load integrally by calculating continuity equation and the equation of motion about bed load and suspended load, respectively.

The developed model was applied to the flood in August 1981 at the Ishikari River where the bed variations during the flood was almost dominated by suspended sediment motions. In the meandering reach, the calculation results demonstrated that the maximum velocity filament passed the inner bank that was the characteristics of the compound meandering channel flow. Therefore, the floodplain at the inner bank side in the meandering reach was scoured during the flood.

1. 序論

我が国の河川の断面形は、複断面河道が主流となっているが、近年、河川の流下能力の改善のため、福岡県の遠賀川では複断面河道から船底形断面河道への改修が進められている。船底形断面河道は、複断面河道の高水敷を緩やかな斜面に改修したものであり、治水・環境・景観の面から優れた河道断面形であると言われている⁽¹⁾。一方、著者らは緩やかな蛇行の内岸側に位置する船底形河道区間については、洪水時に主流が高水敷に乗り上げることにより、細粒土砂が高水敷と低水路の境界付近に堆積し易くなっていることを明らかにした⁽²⁾。このため、土砂の堆積しづらい安定した船底形河道の設計、管理を行うためには、河道断面形だけではなく河道の蛇行と湾曲、低水路線形との関係を考慮して検討する必要がある。これらの検討を行うためには、洪水時の細粒土砂の輸送・堆積・浮上の機構を適切に評価できる数値解析モデルを開発する必要がある。洪水時における洪水流河床変動解析は、掃流砂は芦田・道上式等の平衡流砂量式、浮遊砂は移流拡散方程式により別々に扱われているが、両者の非平衡的な輸送過程を一体的に扱う必要があることが近年の研究で明らかとなった。

本研究では、掃流砂と浮遊砂の運動をそれぞれの連続式と運動方程式を用いて非平衡性を考慮し、浮遊砂と掃流砂を一体的に扱うことができる準三次元洪水流・河床変動解析法を開発する。そして、洪水時に浮遊砂が卓越した石狩川河口部の昭和 56 年 8 月洪水に適用することで本解析法の妥当性について検討する。

2. 準三次元洪水流・河床変動解析法

Fig.1 と Fig.2 は、本解析における洪水流・河床変動解析の枠組みを示す。また、Fig.3 は底面付近の土砂移動のイメージ図を示す。洪水時の河川の底面付近では、滑動・転動・跳躍といった掃流運動をしている粒子が、鉛直上向きの流れや強い流れの乱れ成分が生じると浮遊砂として巻き上げられ、輸送される。そのため、本解析の河床変動解析では、掃流砂から浮遊砂への遷移機構と掃流砂・浮遊砂の非平衡運動を力学的に忠実に評価するため、それぞれの運動を連続式と運動方程式を計算することで一体的に扱う。

2-1. 洪水流解析法

Fig.1 は、本解析における流速と乱れエネルギーの鉛直分布を

示す。本解析の洪水流の解析法は、水深積分した連続式と運動方程式に加え、水面と底面のそれぞれの運動方程式を解くことで三次元流れを求めることができる準三次元解析法 (Q3D-FEBS 法) を用いた。この解析法では、流速鉛直分布を三次関数と仮定し、各運動方程式より求めた水深平均流速、水面流速、底面流速と、水面における流速の鉛直勾配がゼロという条件より、式(1)のように求めている。

なお、本論文ではレイノルズ平均値と水深平均値を区別するため、レイノルズ平均値を"-"、レイノルズ平均値からの偏差を"'", 水深平均値を"~", 水深平均値からの偏差を"'"として表現する。

$$\bar{u}_i(\eta) = \Delta \bar{u}_i(12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) - \delta \bar{u}_i(4\eta^3 - 3\eta^2) + \bar{U}_i \quad (1)$$

ここに、 $i, j=1, 2(x, y$ 方向), $\bar{u}_i(\eta)$: 任意高さにおける i 方向の流速, $\Delta \bar{u}_i = \bar{u}_{si} - \bar{U}_i$, $\delta \bar{u}_i = \bar{u}_{si} - \bar{u}_{bi}$, $\eta = (\bar{z}_s - z) / \bar{h}$, \bar{U}_i : i 方向の水深平均流速, \bar{u}_{si} : i 方向の水面流速, \bar{u}_{bi} : i 方向の底面流速, \bar{z}_s : 水位, \bar{h} : 水深である

また、以下に解析に用いた水深積分連続式、水深積分・水表面・底面それぞれの運動方程式を示す。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{h}}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j \bar{h}}{\partial x_j} = -g \bar{h} \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}'' \bar{h}}{\partial x_i} - \frac{\bar{p}_b''}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \hat{\zeta}_{bi} \frac{\hat{\tau}_{bi}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{h} \bar{T}_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_{si}}{\partial t} + \bar{u}_{si} \frac{\partial \bar{u}_{si}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho \bar{h}} \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{p}''}{\partial \eta} \Big|_s + \check{\zeta} \frac{\sqrt{v_{ts}}}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial z^2} \Big|_s \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_{bi}}{\partial t} + \bar{u}_{bi} \frac{\partial \bar{u}_{bi}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}_b''}{\partial x_i}$$

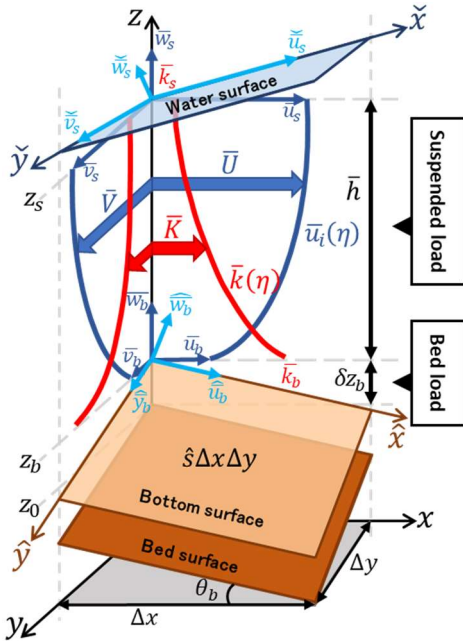


Fig.1 Vertical distributions of velocity and turbulent kinetic energy.

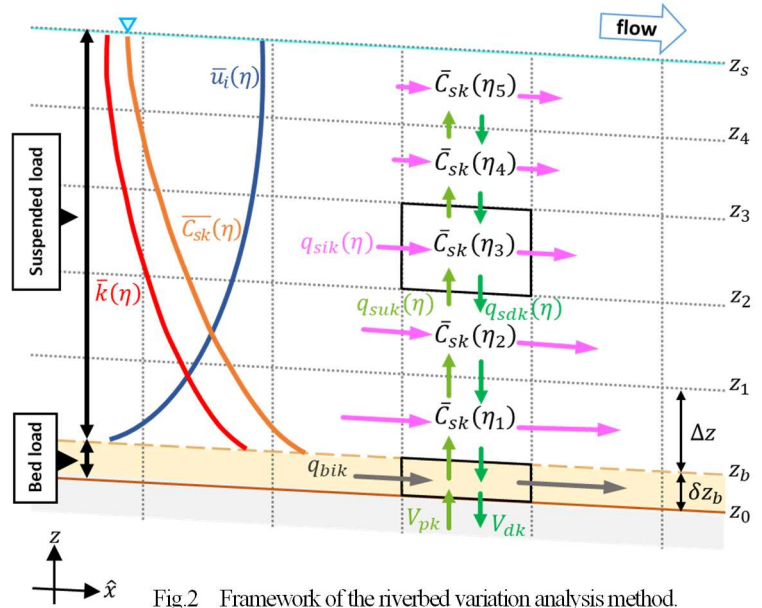


Fig.2 Framework of the riverbed variation analysis method.

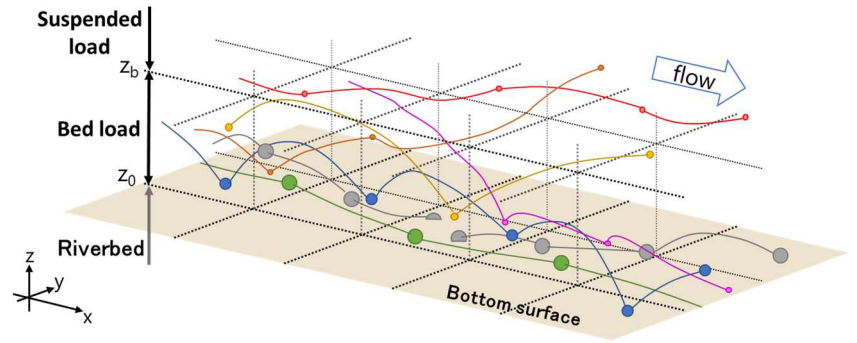


Fig.3 Image of sediment transport near the bottom surface during the flood.

$$-\frac{1}{\rho h} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{p}''}{\partial \eta} \Big|_b + \hat{S} \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \bar{\tau}_i}{\partial \eta} \Big|_b \quad (5)$$

ここに、 t : 時間、 g : 重力加速度、 ρ : 水の密度($\rho=1.0$)、 \bar{p}'' : 圧力の非静水圧成分の水深平均値、 \bar{p}_b'' : 底面での圧力の非静水圧成分、 $\hat{\tau}_{bi}$: 底面に作用する河床面に沿う方向のせん断応力、 $\hat{S} = 1/\cos\theta_b = \sqrt{1 + (\partial z_b/\partial x_i)^2}$ 、 ν_i : 渦動粘性係数、 S_{ij} : 水深平均流速のひずみ速度である。なお本論文では、斜面に沿う方向の座標を" \wedge "、水面に沿う方向の座標を" \vee "と表現する。

また、乱れエネルギーの鉛直分布についても、式(6)で示す三次関数を仮定し、水表面、底面、水深平均それぞれの乱れエネルギーの輸送方程式を解くことで、流れと同様に乱れエネルギーの分布を求めている。

$$\bar{k}(\eta) = \Delta \bar{k}(12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + \delta \bar{k}(-4\eta^3 + 3\eta^2) + \bar{K} \quad (6)$$

ここに、 $\bar{k}(\eta)$: 任意高さにおける乱れエネルギー、 $\Delta \bar{k} = \bar{k}_s - \bar{K}$ 、 $\delta \bar{k} = \bar{k}_s - \bar{k}_b$ 、 \bar{K} : 水深平均乱れエネルギー、 \bar{k}_s : 水面の乱れエネルギー、 \bar{k}_b : 底面の乱れエネルギーである。

また、以下に水深積分・水表面・底面それぞれの乱れエネルギーの輸送方程式を示す。

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{K}}{\partial x_j} = \bar{P}_k - C_d \frac{\bar{K}^{3/2}}{l_d}$$

$$+ \frac{\bar{v}_t}{h \sigma_k} \frac{\partial^2 \bar{K}}{\partial x_j^2} + \frac{1}{h^2} \frac{\bar{v}_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial \bar{k}}{\partial \eta} \Big|_b \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{k}_s}{\partial t} + \bar{u}_{sj} \frac{\partial \bar{k}_s}{\partial x_j} = -C_{ds} \frac{\bar{k}_s^{3/2}}{l_d} + \frac{\bar{v}_{ts}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 \bar{k}_s}{\partial x_j^2} + \hat{S} \frac{1}{h^2} \frac{\bar{v}_{ts}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 \bar{k}}{\partial \eta^2} \Big|_s \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{k}_b}{\partial t} + \bar{u}_{bj} \frac{\partial \bar{k}_b}{\partial x_j} = \bar{P}_{kb} - C_{db} \frac{\bar{k}_b^{3/2}}{l_{db}} + \frac{\bar{v}_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 \bar{k}_b}{\partial x_j^2} + \frac{\hat{S}}{h^2} \frac{\bar{v}_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 \bar{k}}{\partial \eta^2} \Big|_b \quad (9)$$

ここに、 \bar{P}_k : 水深平均された乱れエネルギーの生産項、 l_d : 乱れのスケール($l_d = 0.07h$)、 l_{db} : 底面の乱れのスケール($l_{db} = 0.032h$)、 $C_d = C_{ds} = 0.1$ 、 $C_{db} = 0.06$ 、 $\sigma_k = 1.0$ である。

2-2. 河床変動解析

本解析では、掃流砂の運動を粒子が底面付近を跳躍運動している状態であると定義し、浮遊砂の運動については跳躍運動をしていた粒子が鉛直上向きの流れや流れの乱れ成分によって上向き方向に巻き上げられ、粒子が流れに追従するようになった状態であると定義する。

(1) 掃流砂の解析

河床の斜面に沿う方向の単位幅掃流砂量 \hat{q}_{bik} は、単位面積当たりの流砂体積 \bar{V}_{bk} と、河床に沿う方向の砂粒子の平均移動速度 \hat{u}_{pik} との積で表される(式(10))。

$$\hat{q}_{bik} = \bar{V}_{bk} \hat{u}_{pik} \quad (10)$$

単位面積当たりの流砂体積は、式(11)に示す掃流砂の連続式により求めており、この連続式には、粒子の河床からの離脱量、掃流砂から河床へ堆積する量、掃流砂から浮遊砂への遷移量、浮遊砂から掃流砂への遷移量のそれぞれが考慮されている。これにより掃流砂と浮遊砂を一體的に解析することができる。

$$\frac{\partial \bar{V}_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{q}_{bjk} / \cos \theta_{bj}}{\partial x_j} = (\bar{V}_{pk} - \bar{V}_{dk} - \bar{q}_{suk} + \bar{q}_{sdk}) \hat{S} \quad (11)$$

ここに、 \bar{V}_{pk} ：河床からの離脱量、 \bar{V}_{dk} ：河床への堆積量、 \bar{q}_{suk} ：掃流砂から浮遊砂への遷移量、 \bar{q}_{sdk} ：浮遊砂から掃流砂への遷移量である。

砂粒子の斜面に沿う方向の平均速度については、準三次元解析の流れ場を外力条件として、粒子の跳躍運動に関する三次元の運動方程式(式(12))により求める。

$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{\partial \hat{u}_{pik}}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d_k^2 (\hat{u}_{bi} - \hat{u}_{pik}) |\hat{\mathbf{u}}_b - \hat{\mathbf{u}}_{pk}| - A_3(\rho_s - \rho) g_i d_k^3 \quad (12)$$

$$\hat{u}_{pik} = \frac{1}{T_{sal}} \int_0^{T_{sal}} \hat{u}_{pik} dt, \quad T_{sal} = 10.0(\text{s})$$

ここに、 $i=1,2,3(x,y,z)$ 方向、 ρ_s ：砂粒子の密度(=2.65)、 d_k ：粒径、 g_z ：重力加速度、 A_2 ：2次元の形状係数(= $\pi/4$)、 A_3 ：3次元の形状係数(= $\pi/6$)、 \hat{u}_{pik} ：砂粒子の瞬間速度、 \mathbf{u}_p ：砂粒子の速度ベクトル、 \mathbf{u}_b ：底面における粒子周辺の流速ベクトル、 C_D ：抗力係数($C_D=0.4$)、 C_M ：付加質量係数($C_M=0.5$)である。また、 T_{sal} は砂粒子の平均速度を求める際に平均化する時間であり、本解析では10秒としている。

河床からの離脱量と河床への堆積量は、修正長田・福岡モデル⁹⁾と同様に計算している。離脱量については離脱判定の対象粒子に作用する流体力を準三次元解析から求め、これが固定粒子を乗り越えるまでの時間 T_{pk} を以下の式により求める。

$$\bar{V}_{pk} = \varepsilon_p \left(\frac{p_k}{A_2 d_k^2} \right) \left(\frac{A_3 d_k^3}{T_{pk}} \right), \quad \varepsilon_p = 0.010 \quad (13)$$

ここに、 p_k ：粒径階 k の河床表層の存在割合であり、各粒径集団に対する河床表層の連続式により求める。

$$\frac{\partial p_k}{\partial t} = -\frac{A_2 \hat{S}}{A_3 d_m} (\bar{V}_{pk} - \bar{V}_{dk}) - p'_k \frac{A_2 \hat{S}}{A_3 d_m} \sum_{k=1}^{k_{max}} (\bar{V}_{pk} - \bar{V}_{dk}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} > 0, p'_k = p_k, \quad \frac{\partial z_b}{\partial t} \leq 0, p'_k = p_{k0}$$

ここで、 p_{k0} ：河床表層下の粒度の存在割合、 d_m ：平均粒径である。

また、河床への堆積量については、準三次元解析の流れ場の条件下で砂粒子の跳躍解析を行い、粒子が停止するまでの時間 T_k を計算し、以下の式により求める。

$$\bar{V}_{dk} = \bar{V}_{bk} / \bar{T}_k \quad (15)$$

格子平均の河床高の時間変化については、以下の河床高の連続式より求める。

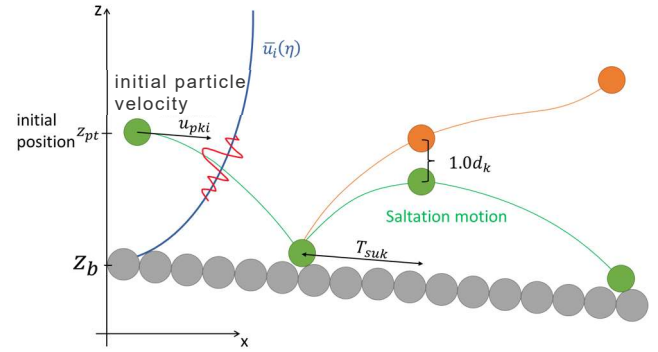


Fig.4 Calculation method of the amount of transition from bed load to suspended load.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{A_2 \hat{S}}{A_3} \sum_{k=1}^{k_{max}} (\bar{V}_{pk} - \bar{V}_{dk}) \quad (16)$$

(2) 掃流砂から浮遊砂への遷移量と浮遊砂から掃流砂への遷移量

Fig.4 は掃流砂から浮遊砂への遷移量の算定法について示す。本解析では、底面付近で跳躍運動をしていた粒子が鉛直上向き流れと流れの乱れ成分によって上向きに巻き上がり、流れに追従するようになった状態の粒子を浮遊砂と定義する。従って、浮遊砂への浮上量 \bar{q}_{suk} を求める際には、乱れ成分を考慮した粒子の三次元運動方程式を用いた跳躍解析と、レイノルズ平均流場のみを考慮した跳躍解析を同時に行い、乱れを考慮した跳躍解析を各粒径において粒子の最大跳躍高さが、レイノルズ平均流場のみを考慮した跳躍解析の各粒径の粒子の最大跳躍高さよりも粒径の1.0倍以上高くなれば、その粒子は浮遊砂に遷移したとみなす。この跳躍解析を試行回数 N_{max} 回を行い、浮遊砂に遷移した個数を数えることで掃流砂から浮遊砂への遷移量を求めている。

$$\bar{q}_{suk} = \frac{N_{suk}}{N_{max} T_{suk}} \bar{V}_{bk} \quad (17)$$

ここで、 \bar{q}_{suk} ：単位時間・単位面積当たりの掃流砂から浮遊砂への遷移量、 N_{suk} ：掃流砂から浮遊砂へ遷移した粒子の個数、 N_{max} ：試行回数 ($N_{max} = 100$)、 T_{suk} ：粒子が浮遊砂に遷移するまでの時間である。

ここで、流れの乱れ成分を考慮した粒子の運動方程式を以下に示す。

$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{d \hat{u}_{ptki}}{dt} = 0.5 A_2 C_D \rho d_k^2 (\hat{u}_{bi} + \hat{u}'_{bi} - \hat{u}_{ptki}) |\hat{\mathbf{u}}_b + \hat{\mathbf{u}}'_b - \hat{\mathbf{u}}_{ptk}| - A_3(\rho_s - \rho) g_z d_k^3 \quad (18)$$

ここで、流れの乱れ成分 \hat{u}'_{bi} は、正規分布($N(\sigma, \mu)$, $\sigma^2 = \frac{u'_{bi} u'_{bi}}{2}$, $\mu = \hat{u}_{bi}$)に従うと仮定し、正規乱数により与えた。なお $u'_{bi} u'_{bi}$ は乱れ強度であり、乱れの等方性を仮定し $u'_{bi} u'_{bj} = (2/3) k_b$ により与えている。

また、跳躍解析を行う際の粒子の初期高さは粒径の2~3倍の範囲でランダムに与え、初速度は掃流砂の解析の際に求めた粒子の平均移動速度 \hat{u}_{pik} とする。

浮遊砂から掃流砂への遷移量 \bar{q}_{sak} は、粒子の沈降速度 w_{fk} と次に示す三次元の浮遊砂解析における底面付近の浮遊砂濃度 $\bar{C}(\eta_1)$ の積で表した。

(3) 浮遊砂の三次元解析

浮遊砂の三次元運動については、まず、各高さで粒径ごとの粒子の運動方程式を流れの乱れ成分を考慮して解くことで各瞬間の粒子速度と浮遊砂の輸送フラックスを算定する。そして、これを時間平均した浮遊砂の輸送フラックスを用い、時間平均の浮遊砂の三次元連続式を解く。

以下に、各粒径の浮遊砂の連続式を示す。

$$\frac{\partial \bar{c}_{sk}(\eta) \Delta x \Delta y \Delta z}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}_{sxx}(\eta) \Delta y \Delta z}{\partial x} + \frac{\partial \bar{q}_{syy}(\eta) \Delta x \Delta z}{\partial y} + \frac{\partial \hat{q}_{szz}(\eta) \Delta x \Delta y}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

ここで、 $\bar{c}_{sk}(\eta)$: 各高さの浮遊砂濃度、 $\bar{q}_{sxx}(\eta)$, $\bar{q}_{syy}(\eta)$: x, y 方向における単位面積当たりの浮遊砂の輸送フラックス、 $\hat{q}_{szz}(\eta)$: 鉛直方向の浮遊砂の輸送フラックスである。

浮遊砂の輸送フラックスは、各高さの浮遊砂濃度 $\bar{c}_{sk}(\eta)$ と粒子速度 $\bar{u}_{ispk}(\eta)$ の積で表している。

鉛直方向の浮遊砂の輸送フラックスの時間平均値 $\hat{q}_{szz}(\eta)$ は、式(21)を用いて乱れスケールの時間 t_{smax} の間粒子を追跡して計算し、その時間 t_{smax} で平均することで以下のように求める。

$$\hat{q}_{szz}(\eta) = \frac{1}{t_{smax}} \int_0^{t_{smax}} \bar{w}_{spk}(\eta) \bar{c}_{sk,up}(\eta) dt \quad (20)$$

$$t_{smax} = \frac{l_d}{\sqrt{k(\eta)}}$$

ここで、 $\bar{c}_{sk,up}(\eta)$ の添え字の up は風上側の濃度を用いることを表わし、各瞬間の鉛直方向の浮遊砂の輸送フラックスを求める際には各瞬間の鉛直方向流速の正負より風上方向を求め、その浮遊砂濃度 $\bar{c}_{sk,up}(\eta)$ を計算に用いる。粒子の鉛直方向流速の瞬間値 $\bar{w}_{spk}(\eta)$ については、流れの乱れ成分を考慮した粒子の運動方程式(式(21))を用いて計算する。

$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{\partial \bar{w}_{spk}(\eta)}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d_k^2 (\bar{w}'(\eta) + \hat{w}'(\eta) - \bar{w}_{spk}(\eta)) \cdot |\bar{u}(\eta) + \hat{u}'(\eta) - \bar{u}_{pk}(\eta)| - A_3(\rho_s - \rho) g_z d_k^3 \quad (21)$$

ここで、流速の乱れ成分 $\bar{w}'(\eta)$ は(2)節と同様に、正規分布 $(N(\sigma, \mu), \sigma^2 = \overline{u'_{bi} u'_{bi}}, \mu = \overline{u_{bi}})$ に従うと仮定した。そして乱れ強度 $\overline{u'_{bi} u'_{bi}}$ は乱れの等方性を仮定し $\overline{u'_{bi} u'_{bj}} = (2/3) \bar{k}(\eta)$ により各高さの乱れ強度を用いて与えている。

なお水平方向の粒子速度 $\bar{u}_{spk}(\eta)$, $\bar{v}_{spk}(\eta)$ は、粒子は速やかに流れに追従するとして、各高さの流速 $\bar{u}_i(\eta)$ と等しいと仮定している。

また、底面($\eta = \eta_b$)における浮遊砂の鉛直方向の輸送については(2)節で求めた掃流砂から浮遊砂への遷移量 \bar{q}_{suk} と浮遊砂から掃流砂への遷移量 \bar{q}_{suk} を用いて式(22)のように表現する。

$$\hat{q}_{szz}(\eta_b) = \bar{q}_{suk} - \bar{q}_{suk} \quad (22)$$

3. 解析条件

本解析法を、北海道の石狩川で発生した昭和56年8月洪水に適用した。Fig.5は、本研究の解析区間を示す。解析範囲は石狩川の15kmから河口沖3kmまでとした。上流端境界条件は、篠路水位観測所(15km)における昭和56年8月洪水時の観測水位ハイドログラフを与えた。下流端境界条件は、河口沖3kmに小樽港の潮位時系列データを与えた。計算格子の解像度は、流下方向25m×横断方向8mとした。

Fig.6は、解析に用いた河床材料の粒度分布を示す。解析に用いた河床材料の粒度分布は、平成3年から平成23年に調査された

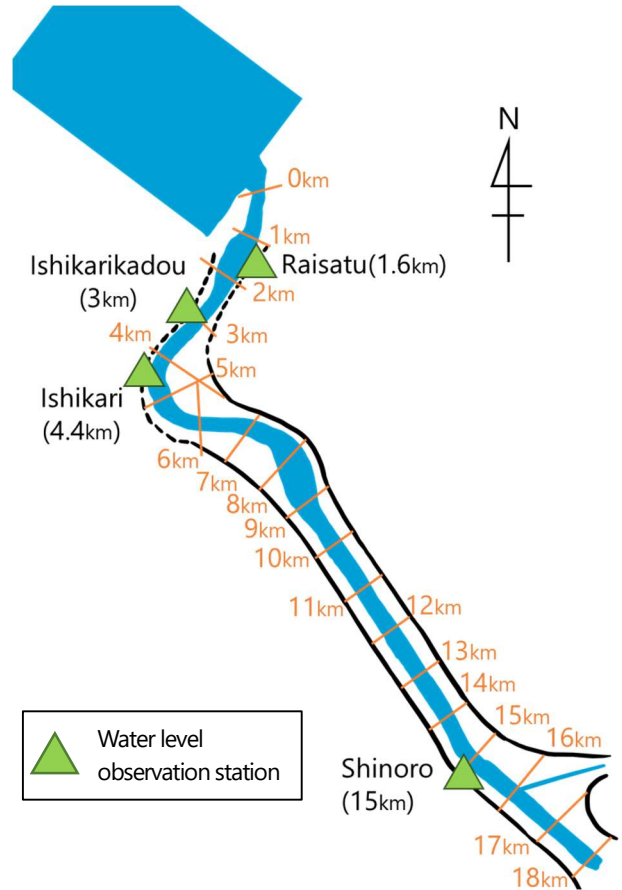


Fig.5 Calculation reach

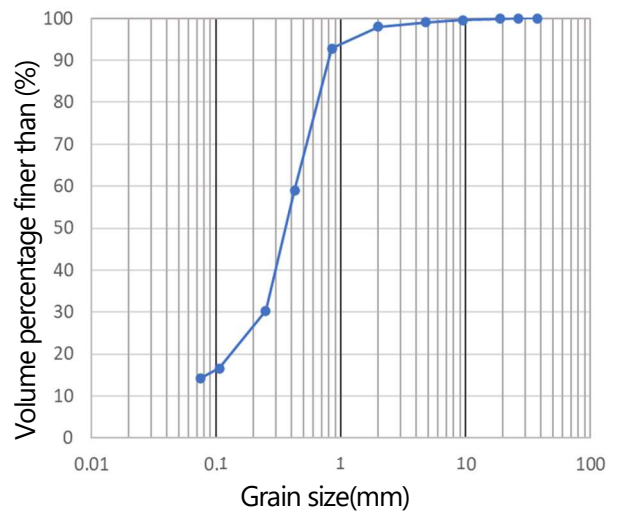


Fig.6 Grain size distribution used for calculation.

実測の粒度分布を平均化した値を用いている。

4. 解析結果とその考察

Fig.7は洪水増水期の観測水面形と解析水面形の比較を示す。ここで、プロットは観測値(○は左岸側, ●は右岸側)、実線は解析値(AVEは断面平均値, Lは左岸側, Rは右岸側)を示している。Fig.8は15km地点にある篠路水位観測所におけるH-Q観測流量と解析流量の比較を示す。解析は未だT3までの計算途中であるが、図より、解析水面形解析流量は実際の流量を再現することが

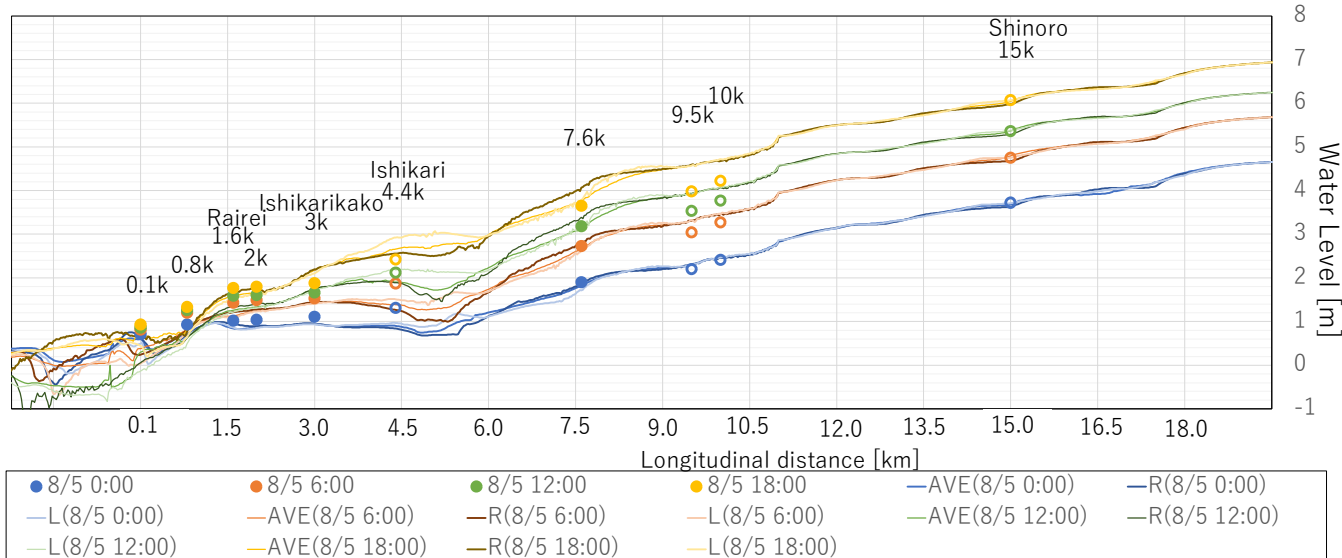


Fig.7 Comparisons between observed and calculated water surface profiles.

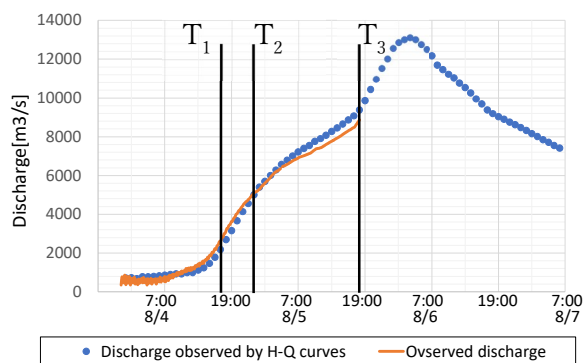


Fig8 Comparisons between observed and calculated discharge hydrograph.

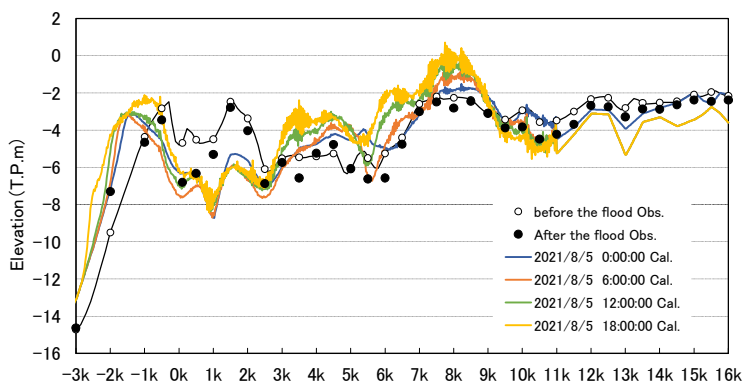


Fig.9 Comparisons between observed and calculated bed profiles.

できている。

Fig.9 は洪水前後の平均河床高の実測値と解析平均河床高の比較を示す。図より、石狩川の蛇行部の始まりである 7.5km 付近までは概ね水面形を再現できているが、それよりも下流側においては解析水位が実測値よりも低く計算されている。これは、本解析では河口付近の河床が実際よりも大きく洗掘されたことが原因であり、それに伴い 7km より下流側の水位が低くなったためであると考えられる。

Fig.10 は主流速（水深平均値）のコンターとベクトルの時間変化を示す。なお実線は地盤高の等高線を示している。また Fig.11 は 5km 横断における主流速コンターと二次流の解析結果の時間変化を示す。洪水時のこの区間の流れは複断面蛇行流れとなっており、福岡によれば高水敷水深が低水路水深の 3 割を超えると内岸側の流速が速くなる特徴をもつ⁴⁾。図より、流量が 2000m³/s 程の洪水初期の段階(T₁)では、蛇行部における主流速は外岸側が速くなっているが、流量が 5000m³/s 程になる(T₂)と中水敷きの肩が掘れ始め、徐々に主流速が内岸側へと移動し始める。そして、流量が 8000m³/s 程になる(T₃)と内岸側が主流速が速くなっている。これにより、流量が増加するにつれて最大主流速が内岸側に移動し中水敷が洗掘されている。また、Fig.11 にて初期河床と解析河床形状を比較すると、主流が通る場所が洗掘されその周りでは土砂が堆積していることが分かる。

Fig.12 は洪水後の河床形状の実測値と T₃における解析河床形状の比較を示す。図より、実測に見られるように、解析では中水敷の肩が洗掘され、内岸側への堆積が生じている。

Fig.13 は T₃における底面の乱れエネルギーコンター図を示す。また、Fig.14 は T₃における掃流砂から浮遊砂への遷移量のコンター図を示す。図より、主流速が生じている中水敷きの肩付近や水衝部で底面の乱れエネルギーが大きくなっており、そのような場所では掃流砂から浮遊砂への遷移量が多くなっている。Fig.15 は底面付近の浮遊砂濃度のコンター図を示しており、底面付近の浮遊砂濃度は主流速が生じている蛇行部の中水敷上などで特に高くなっていた。従って、底面の乱れエネルギーが高い場所で巻き上げられた浮遊砂が、主流によって下流側に輸送されており、内岸側の中水敷きの洗掘が助長されている。

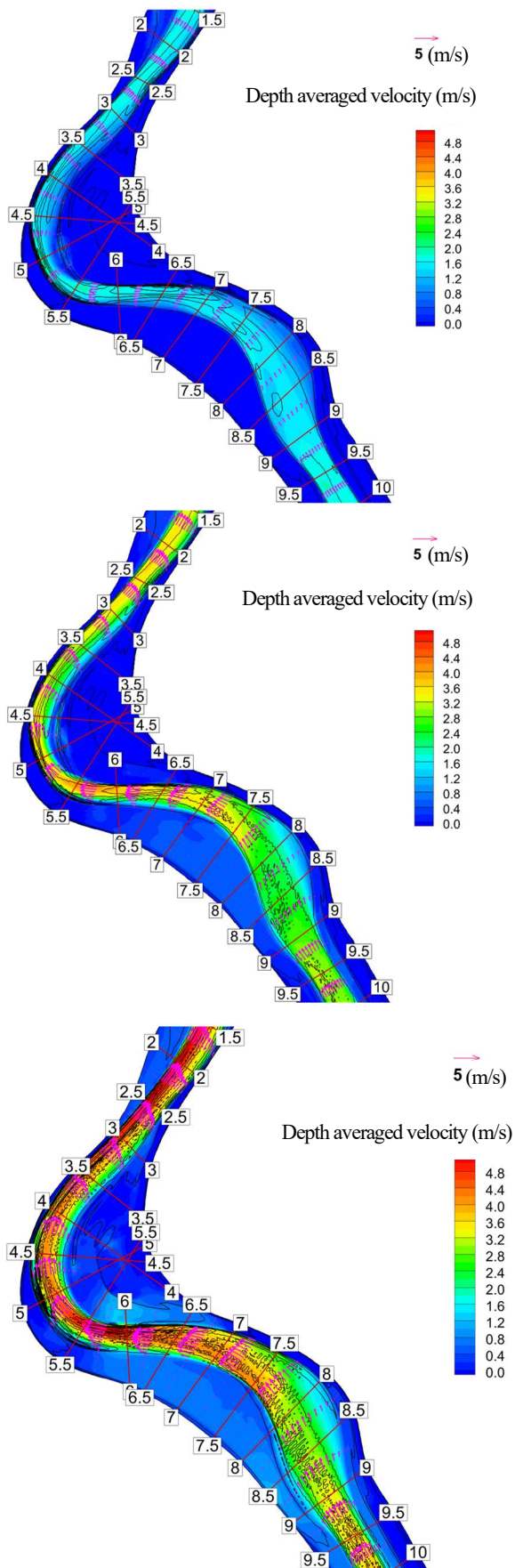


Fig.10 Contour of Depth averaged velocity at 18:00

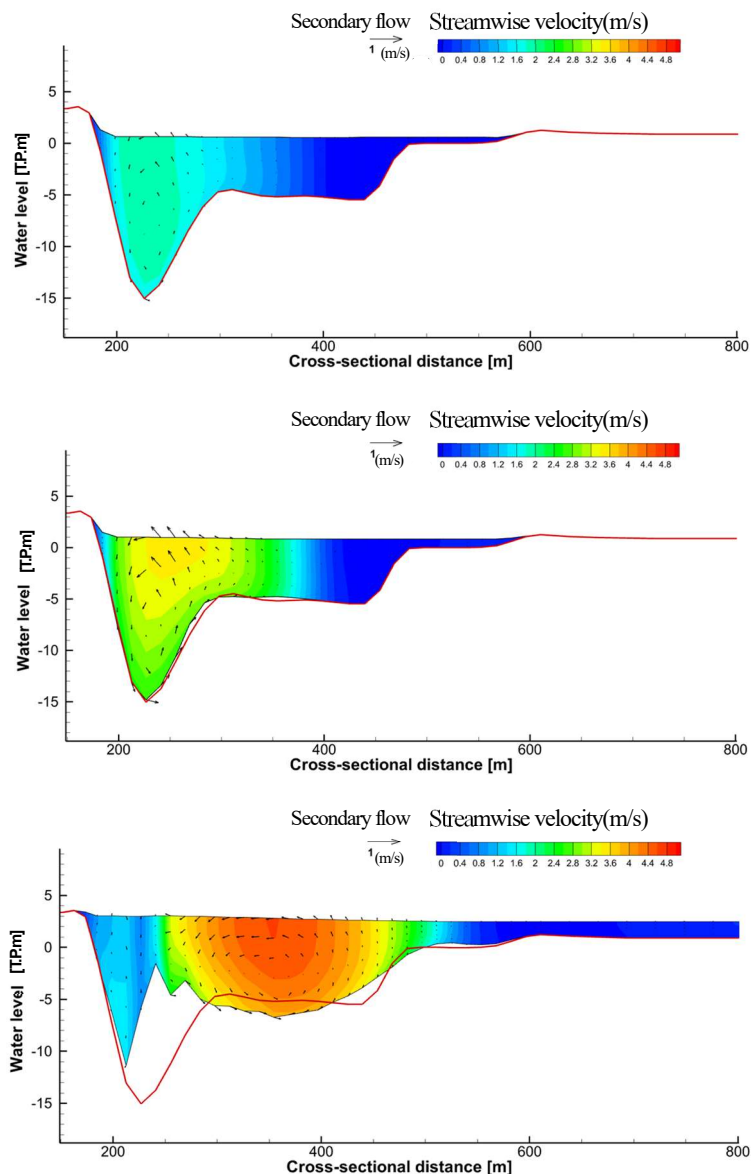


Fig.11 Contour of streamwise velocity distribution and vector of secondary flow at 18:00 in 5.0km.

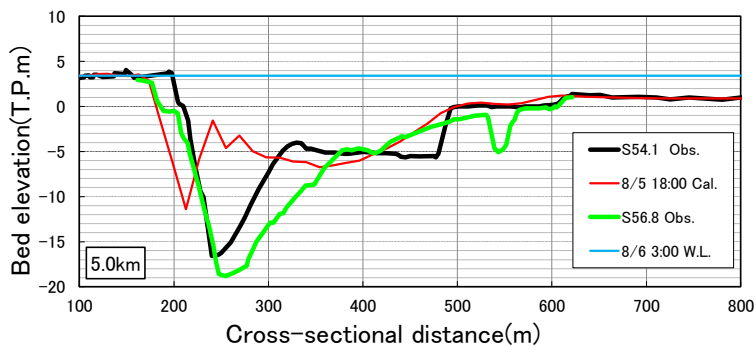


Fig.12 Comparisons between observed and calculated bed profiles at 5.0km.

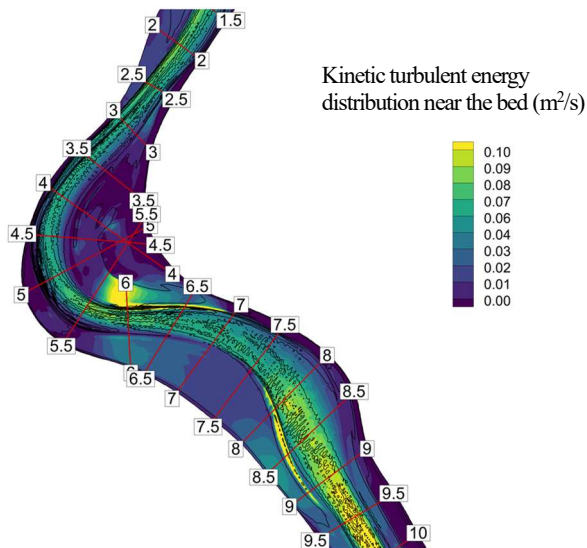


Fig.13 Contour of kinetic turbulent energy distribution near the bed at 18:00

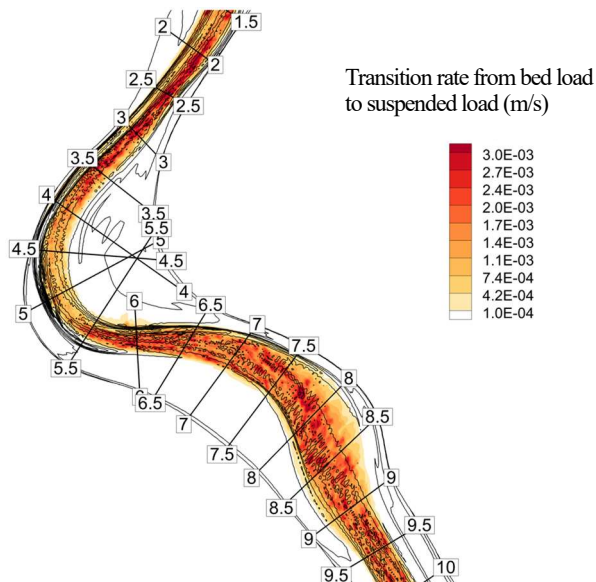


Fig.14 Contour of transition rate from bed load to suspended load at 18:00.

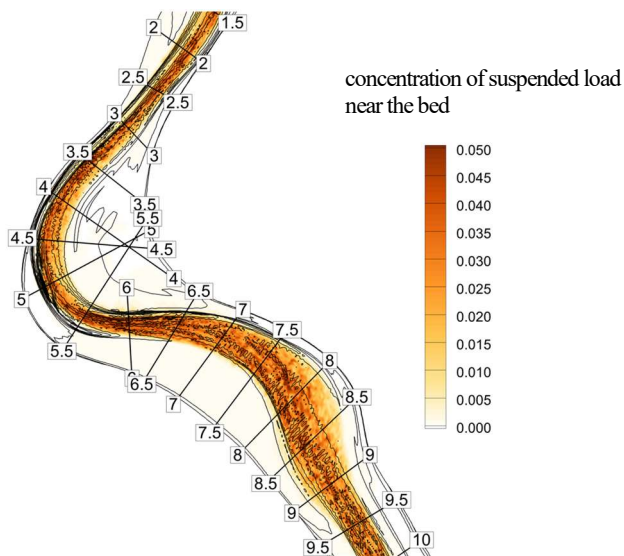


Fig.15 Contour of concentration of suspended load near the bed at 18:00.

5. まとめ

本研究では、掃流砂と浮遊砂の運動をそれぞれの連続式と運動方程式を用いて非平衡性を考慮し、浮遊砂と掃流砂を一体的に扱うことができる準三次元洪水流・河床変動解析法を開発した。そして、洪水時に浮遊砂が卓越した石狩川河口部の昭和 56 年 8 月洪水に適用し、本解析法の妥当性について検討した。

解析の結果、洪水時の石狩川蛇行部は複断面蛇行流れとなっており、高水の流量が増加するにつれて最大主流速の位置が段々と内岸側へ移動した。その結果、内岸側の中水敷の洗掘が進行していったことを示した。

参考文献

- 1) 福岡捷二：温暖化に対する河川の適応技術のあり方—治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて—, 土木学会論文集F, Vol.66, No.4, pp.471-489, 2010.
- 2) 長谷部夏希, 山口広喜, 後藤岳久, 福岡捷二, : 船底型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—安定な船底型河道の設計に向けた検討—, 河川技術論文集, 第 27 巻, pp.463-468, 2021.
- 3) 竹村吉晴, 久保宜之, 岡田将治, 福岡捷二：洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構 に関する研究, 河川技術論文集, 26 巻, pp.669-674, 2020.
- 4) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.