

# 掃流砂と浮遊砂の一体解析 (Q3D-INEBS) による 洪水時の河床波の移動・変形過程の解析的研究 - 網状砂州と砂堆の重畳する斐伊川を対象に -

ANALYTICAL STUDY OF DEFORMATION PROCESSES OF SAND WAVES  
DURING FLOODS USING THE INTEGRATED ANALYSIS OF BED LOAD AND  
SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT (Q3D-INEBS)

後藤岳久<sup>1</sup>・福岡捷二<sup>2</sup>・児子真也<sup>3</sup>

Takahisa GOTOH, Shoji FUKUOKA and Shinya NIGO

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

<sup>2</sup>フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

<sup>3</sup>正会員 博士(工) 国土交通省 水管理・国土保全局 治水課 企画専門官(前 出雲河川事務所 所長)  
(〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

河川における大洪水時の流れは浮遊砂を大量に含んでおり、浮遊砂の時空間変化は洪水時の河道縦横断面の変化、砂州の移動・変形等の大規模な河床変動を生じさせ、結果として洪水の流れを規定している。このため、大洪水時にあっては、掃流砂・浮遊砂の非平衡運動を力学的に表現出来る洪水流・河床変動解析法が必要である。本研究では、準三次元解析によって計算された流速場と平均的な乱流場を外力条件とし、掃流砂と浮遊砂のそれぞれについて粒子の運動方程式と連続式を解くことで掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析(Q3D-INEBS)を構築した。網状砂州と砂堆の重畳する斐伊川下流部に本解析法を適用し、洪水時の河床波の移動・変形過程、現地の河床変動状況を説明した。本研究によって、河川における流砂がもたらす多くの問題に対し、有力な解析法を提示することが出来た。

**Key Words:** large scale flood, bed load and suspended sediment transport, non-equilibrium sediment motion, braided river, sand dune, Hii River

## 1. 序論

大洪水時の河川の流れは、河床や河岸等に含まれた細粒土砂を巻き上げ、大量の浮遊砂を伴う大規模な河床変動をもたらす。これまで、実河川を対象とした洪水流・河床変動解析では、掃流砂を平衡流砂量式、浮遊砂を平衡状態の底面濃度を用いた移流拡散方程式により計算し、掃流砂・浮遊砂の相互作用がもたらす河床形状の変化を十分考慮できない重要な課題を残していた。

砂粒子が掃流状態で運動している時、流れの乱れの作用によって標高の高い高流速域まで輸送されると、結果的に粒子の跳躍距離が長くなり、浮遊運動として振る舞い、河床変動に及ぼす影響が大きくなることが知られている。このため、準三次元解析法により三次元流れと平均的な乱れの時空間変化を解析し、これらを外力条件として粒子の運動方程式と流砂の連続式を一体的に計算す

ることで、流れ場の変化に応じて掃流砂と浮遊砂が影響し合うことを取り込んだ河床変動解析法が必要となる。

この考えに基づき、長谷部らは、準三次元解析(Q3D-FEBS)<sup>1)</sup>による流れ場を外力条件とし、掃流砂と浮遊砂のそれぞれの運動方程式と連続式を解くことで、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う新しい準三次元洪水流・河床変動解析法を構築した<sup>2)</sup>。さらに、浮遊砂から掃流砂への遷移を組み込み浮遊砂の再浮上を表現することで、多摩川の令和元年大洪水時の砂州の大規模変形を説明したが<sup>3)</sup>、浮遊砂の卓越する砂河川で十分検証出来ていない。構築した掃流砂と浮遊砂の一体解析による洪水流・河床変動解析法を(Q3D-INEBS: Quasi-3D flow and bed variation analysis by Integrated Non-Equilibrium Bedload and Suspended sediment transport)と呼び、これを河床材料がほぼ一様砂で網状砂州と砂堆が重畳し<sup>4)</sup>、浮遊砂の卓越する斐伊川に適用し、ALB測量による詳細地形データを初期条件として洪水時の河床波の移動・変形過程を説明する。

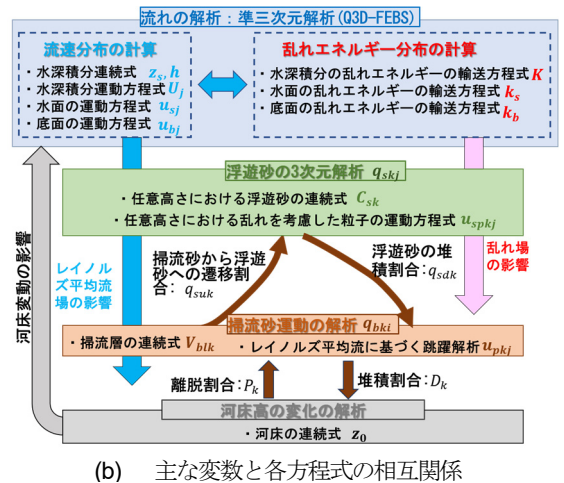
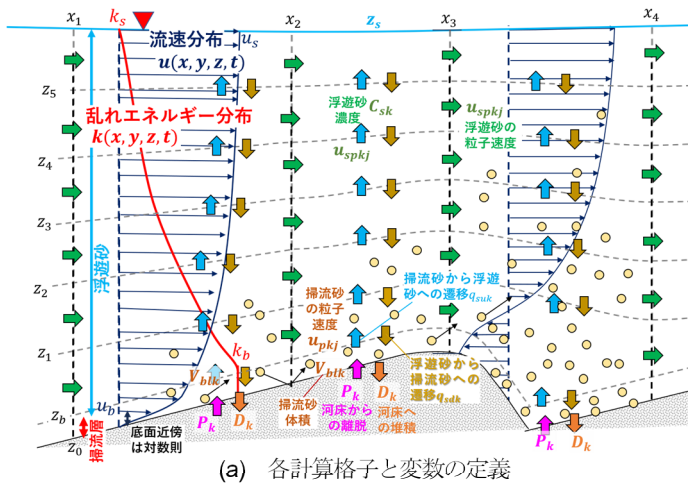


図-1 掃流砂と浮遊砂の一体解析による洪水流・河床変動解析法の枠組み

## 2. 解析方法, 解析条件

図-1は本解析法の枠組みを示す。本解析法の流れの解析には、実河川に適用し易い準三次元解析(Q3D-FEBS<sup>1)</sup>)を用いる。Q3D-FEBSは水深積分された流れの支配方程式に加え、境界面である水面上と底面上の流れの運動方程式を解くことで、境界面の時空間変化に伴う流速分布と圧力分布の変化を精度良く解析することが出来る。このため、流砂の運動を運動方程式と連続式に基づいて解析し、河床形状の時空間変化を適切に解くことが出来れば、境界面が時々刻々変化する洪水時の流れと土砂移動現象を説明できるものと考えられる。本解析では、これに加え、浮遊砂の挙動を計算するには乱流場の評価が必要となるため、水面と底面、水深積分の乱れエネルギーの輸送方程式を解析し、乱れエネルギーの3次元分布を計算出来るようにしている<sup>2)</sup>。河床変動解析については、浮遊砂と掃流砂のそれぞれに関する運動方程式と連続式を両者の相互関係を考慮しながら計算する。河床変動解析に関する具体的な支配方程式を以下に示す。

式(1)は浮遊砂に関する連続式、式(2)は掃流層に関する連続式、式(3)は河床の連続式を示す。

$$S \frac{\partial c_{sk} \Delta z}{\partial t} + \frac{\partial q_{skx} \Delta z \Delta y}{\partial x} + \frac{\partial q_{sky} \Delta z \Delta x}{\partial y} + \frac{\partial q_{skz} S}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

底面境界条件:  $q_{skz}|_b = q_{suk} - q_{sdk}$

$$S \frac{\partial V_{blk}}{\partial t} + \frac{\partial q_{blkx} \Delta y}{\partial x} + \frac{\partial q_{blky} \Delta x}{\partial y} = S(P_k - D_k - q_{suk} + q_{sdk}) \quad (2)$$

$$S \frac{\partial z_0}{\partial t} = S \frac{A_2}{A_3} (-P_k + D_k) \quad (3)$$

ここに、 $c_{sk}$ は3次元で作成された各格子の浮遊砂濃度、 $q_{skx}$ 、 $q_{sky}$ 、 $q_{skz}$ は単位面積当たりの各格子の浮遊砂輸送フラックス、 $S$ は格子面積、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ は格子間隔、 $q_{suk}$ は単位面積・単位時間当たりの掃流砂から浮遊砂への遷移割合、 $q_{sdk}$ は単位面積・単位時間当たりの浮遊砂から

掃流砂への遷移割合、 $V_{blk}$ は単位面積当たりの掃流砂体積、 $P_k$ 、 $D_k$ はそれぞれ単位面積・単位時間当たりの河床からの離脱割合と河床への堆積割合、 $q_{blkx}$ 、 $q_{blky}$ は単位幅当たりの掃流砂量、 $A_3$ 、 $A_2$ は3次元、2次元の形状係数、 $z_0$ は河床高、 $z_b$ は河床高より0.03 $h$ 高い位置の底面流速の算定高、 $h$ は水深、 $k$ は粒径階を示し、添え字の $s$ は浮遊砂、 $bl$ は掃流砂を意味する。

掃流層の連続式(式(2))には、粒子の河床からの離脱割合 $P_k$ と河床への堆積割合 $D_k$ に加え、掃流砂から浮遊砂への遷移割合 $q_{suk}$ 、浮遊砂から掃流砂への遷移割合 $q_{sdk}$ が考慮され、これら $q_{suk}$ 、 $q_{sdk}$ は浮遊砂の連続式(式(1))の底面境界条件にも組み込まれることで、掃流砂と浮遊砂の相互作用を考慮して、掃流砂と浮遊砂を一体的に解析している。

単位幅当たりの掃流砂量 $q_{blkj}$ ( $j=1,2(x,y)$ 方向))は、掃流砂体積 $V_{blk}$ と掃流粒子の平均移動速度 $\bar{u}_{pkj}$ の積で表現する(式(4))。

$$q_{blkj} = V_{blk} \bar{u}_{pkj} \quad (4)$$

掃流粒子の平均移動速度 $\bar{u}_{pkj}$ は、式(5)の掃流運動中の粒子の運動方程式から粒子の瞬間移動速度を求め、式(6)で時間平均することで求める。式(5)の掃流粒子の運動方程式は、各格子で求まる準三次元解析の流速分布と局所河床勾配を与えて計算する。この際、掃流運動中の移動粒子と河床面との衝突の影響については、反発係数( $e=0.7$ )を用いて評価している<sup>3)</sup>。

$$A_3(\rho_s + \rho_{CM})d_k^3 \frac{\partial u_{pkj}}{\partial t} = 0.5\rho C_D A_2 d_k^2 (\bar{u}_{bj} - u_{pkj}) |\bar{\mathbf{u}}_b - \mathbf{u}_{pk}| - A_3(\rho_s - \rho) g_j d_k^3 \quad (5)$$

ここに、 $\rho$ は水の密度、 $g_j$ :重力加速度、 $\rho_s$ は砂粒子の密度、 $C_M (=0.5)$ は付加質量係数、 $d_k$ は粒径、 $u_{pkj}$ は各格子における掃流運動中の粒子の $j$ 方向移動速度の瞬間値、 $C_D (=0.4)$ は抗力係数、 $\bar{u}_{bj}$ はレイノルズ平均流速、 $j=1,2,3(x,y,z)$ 方向を示す。

$$\bar{u}_{pkj} = \frac{1}{T_{sal}} \int_0^{T_{sal}} u_{pkj} dt, T_{sal} = 10.0(s) \quad (6)$$

浮遊砂の連続式(式(1))に用いる浮遊砂の輸送フラックス $q_{skj}$ は、各瞬間の浮遊粒子の移動速度 $u_{spkj}$ と浮遊砂濃度 $c_{sk}$ との積で表し、これを乱れスケールの時間 $t_{mean}(=l_d/(k(\eta))^{0.5})$ で平均化して評価する(式(7))。ここで、式(7)中の浮遊砂濃度 $c_{sk}$ は、各瞬間の浮遊粒子の速度の正負から風上側の格子の浮遊砂濃度を用いる。

$$q_{skj} = \frac{1}{t_{mean}} \int_t^{t+t_{mean}} u_{spkj} c_{sk} dt \quad (7)$$

各瞬間の浮遊粒子の移動速度 $u_{spkj}$ は、式(8)に示す流速の乱流成分を流体力項に考慮した浮遊運動中の粒子の運動方程式により計算する。

$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{\partial u_{spkj}}{\partial t} = 0.5 \rho C_D A_2 d_k^2 (\bar{u}_j + u'_j - u_{spkj}) |\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' - \mathbf{u}_{pk}| - A_3(\rho_s - \rho) g_j d_k^3 \quad (8)$$

ここに、 $u_{spkj}$ は3次元で作成された各格子における浮遊運動中の粒子の $j$ 方向移動速度の瞬間値、 $C_D(=0.4)$ は抗力係数、 $u'_j$ は $j$ 方向の流れの乱流成分、 $\bar{u}_j$ はレイノルズ平均流速を示し、 $j=1,2,3(x,y,z$ 方向)である。流れの乱流成分 $u'_j$ は平均値 $\mu = \bar{u}_j$ 、分散 $\overline{u'_j u'_j}$ の正規分布( $N(\sigma, \mu)$ )に従うと仮定し、関根ら<sup>9)</sup>に倣いマルコフ連鎖の考えに基づき正規乱数を用いて与えた。各方向の乱れ強度 $\overline{u'_j u'_j}$ は、準三次元解析で求めた乱れエネルギーを、瀬津の乱れエネルギーと乱れ強度の関係式<sup>9)</sup>に代入して評価している。

式(2)、式(3)における河床からの粒子の離脱割合 $P_k$ は式(9)より計算し、これは離脱判定対象の粒子が底面付近の流れの流体力によって固定粒子を乗り越えるまでの時間 $T_{pk}$ を長田ら<sup>5)</sup>と同様の方法で求めて評価する。

$$P_k = \left( \frac{\varepsilon_p}{A_2 d_k^2} \right) \left( \frac{A_3 d_k^3}{T_{pk}} \right), \varepsilon_p = 0.018 \quad (9)$$

掃流砂の河床への単位面積・単位時間当たりの堆積割合 $D_k$ は、式(5)に示した掃流粒子の運動方程式により、掃流運動中の粒子が停止するまで計算を行い、その平均停止時間 $T_{dk}$ を求める。そして、停止時間の分布が指数関数に従うとして式(10)より評価する<sup>5)</sup>。

$$D_k = V_{blk} \int_0^1 \frac{1}{T_{dk}} \exp\left(-\frac{t}{T_{dk}}\right) dt \quad (10)$$

単位面積・単位時間当たりの掃流砂から浮遊砂への遷移割合 $q_{suk}$ は、掃流運動状態の粒子が流れの乱流作用によって、標高の高い高流速域まで輸送される粒子の単位時間当たりの個数割合を式(11)より計算する。ここで、 $N_{suk}$ は流れの乱流成分の影響を受けて上向き方向に輸送された粒子の個数、 $N_{max}$ は試行回数(=100回)、 $T_{suk}$ は粒子が浮上するまでに要した時間である。

$$q_{suk} = \frac{N_{suk}}{N_{max} T_{suk}} V_{blk} \quad (11)$$

具体的な計算手順は、まず、準三次元解析によって各時刻で計算された流速場・乱流場を外力条件とし、流体力項に流れの乱流成分を考慮した浮遊粒子の運動方程式

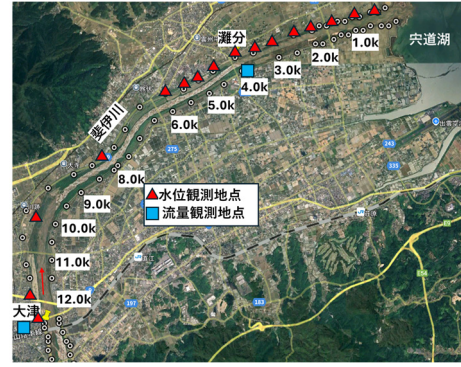


図-2 対象区間とR3.7洪水時における洪水観測体制

(式(8)) による粒子運動の計算と、レイノルズ平均流速のみを考慮した掃流粒子の運動方程式(式(5))による粒子運動の計算を同時に行う。そして、レイノルズ平均流場のみが考慮された掃流粒子の最大跳躍高さに対して、乱流成分の影響が考慮された浮遊粒子の跳躍高さが粒径の15倍以上高い位置まで浮上した状態を浮遊状態になったと見なし、その個数 $N_{suk}$ と時間 $T_{suk}$ を数えた。ここで、浮遊砂の基準とした粒径の15倍は、実測の洪水前後の平均的な河床変動量に合うように設定したものである。

浮遊砂から掃流砂に遷移する単位面積・単位時間当たりの割合 $q_{sdk}$ は、粒子の沈降速度 $w_{sk}$ と底面付近の浮遊砂濃度 $c_{sk}(x, y, z_b, t)$ との積で表現する(式(12))。

$$q_{sdk} = w_{sk} c_{sk}(x, y, z_b, t) \quad (12)$$

図-2は、解析対象区間と解析対象とした令和3年7月洪水の洪水観測体制を示す。対象区間は、斐伊川放水路分流点より下流の14.0kmから宍道湖河口の区間とした。解析は広域計算と詳細計算の2段階で実施した。広域計算は洪水時の網状砂州の挙動を把握するため、約1~2m四方の解析格子で14km~宍道湖河口まで解析した。上下流端境界条件には大津観測所(12.4km)、宍道湖湖心の観測水位を与え、粗度係数は実測水面形を再現する $0.025(m^{-1/3}s)$ を与えた。詳細計算は洪水時の砂堆の挙動まで計算できるように解析格子を0.5m四方とし、広域計算の計算結果を境界条件として13~10km区間を解析した。解析に用いた河床材料は1mmの一樣砂を与え、初期河床には洪水前の令和3年6月のALB測量結果を与えた。

### 3. 解析結果

図-3は水面形時系列の観測結果と解析結果を示し、図-4は流量ハイドログラフの観測結果と解析結果を示す。解析結果は観測された水面形時系列を再現しており、浮子による観測流量ともほぼ対応している。図-5は、洪水初期から洪水ピークの3時間後までの砂州発達段階における河床形状コンター、底面付近の浮遊砂濃度分布、河床変動コンターの解析結果を示す。ここで、図-5(a)(b)の河床形状コンターは、洪水前の平均河床高を差し引くことで、平水流量に対して滞筋となる範囲を青色で、砂

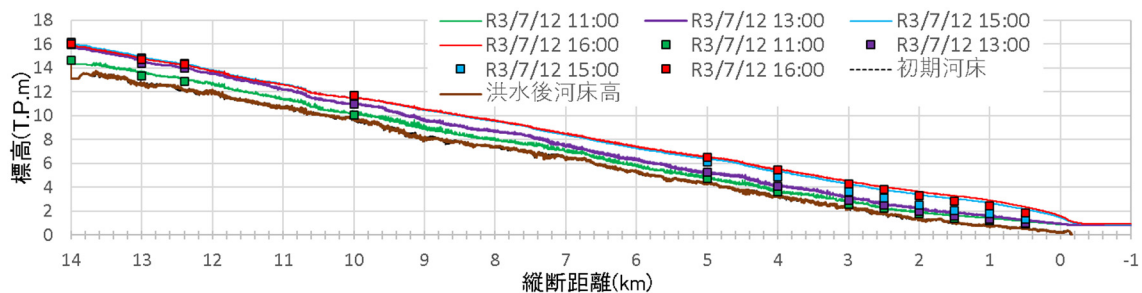


図-3 水面形時系列の観測結果と解析結果の比較

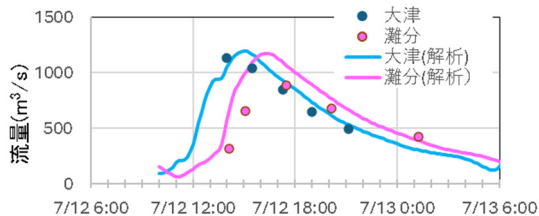
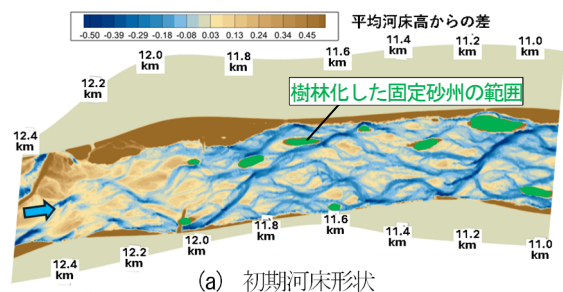
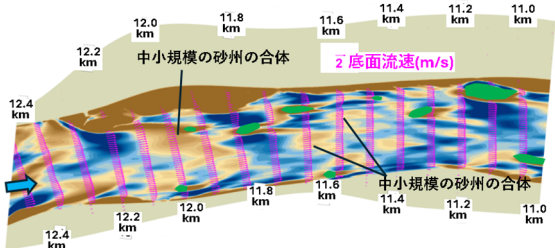


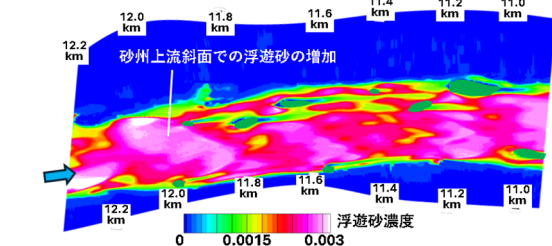
図-4 流量ハイドログラフの観測結果と解析結果の比較



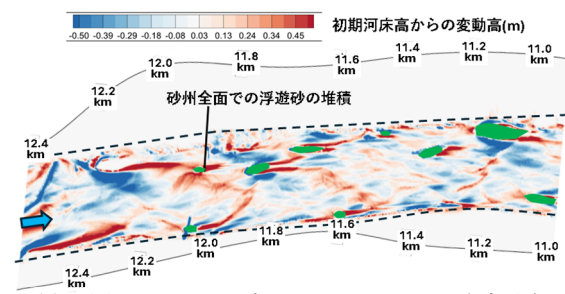
(a) 初期河床形状



(b) 洪水ピークから3時間後(7/12 18:00)の解析河床形状



(c) 洪水ピークから3時間後(7/12 18:00)の底面浮遊砂濃度



(d) 洪水ピークから3時間後(7/12 18:00)の河床変動高

図-5 砂州の発達段階における浮遊砂運動と砂州の挙動

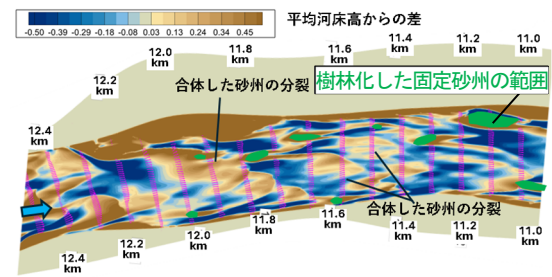
州となる範囲を茶色で示している。この時間帯では、

12.2km付近の左岸寄り、11.7km付近の右岸寄り、11.3km付近左岸寄りにある中小規模の砂州群が洗掘を受け(図-5(d)), 浮遊砂として巻き上げられ(図-5(c)), それらが100~150m程度下流に移動・堆積している(図-5(d))。これによって、中小規模の砂州群が合体し、下流に移動しながら大規模な砂州が形成されることが分かる(図-5(a)(b))。

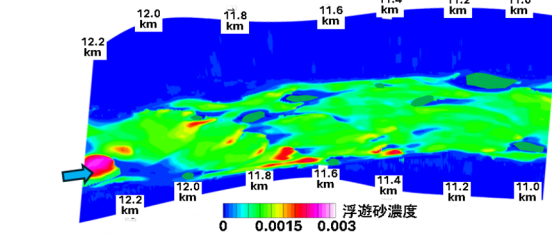
図-6は、洪水減水期から洪水後までの砂州分裂段階における河床形状コンター、底面付近の浮遊砂濃度分布、河床変動コンターの解析結果を示し、図-7は図-5、6の解析結果の時間帯の水位と河床高の関係、洪水ピーク時と減水期の滞筋位置を示す。洪水減水期において、平均水深が1m程度を下回ると、砂州発達段階で形成・発達した砂州の比高の高い砂州に浮遊砂が堆積し(図-6(b)(c)), それに応じて相対的に低い箇所に水が集中している。これにより、滞筋数が増加し、結果的に砂州の分裂が生じ、中小規模の砂州群が形成されている(図-6(a)(d), 図-7)。洪水後の解析河床形状は(図-6(d)), 実測の洪水後の河床形状(図-6(e))と比べて砂州と滞筋との比高差がやや大きく計算されているが、12.0~11.2km付近の砂州の波長や配置は実測と概ね対応している。図-8は洪水ピーク時の掃流砂・浮遊砂の縦断分布を示す。掃流砂量と比べて浮遊砂量が卓越し、浮遊砂量の縦断方向の増加・減少が砂州の洗掘・堆積箇所と対応していることが分かる。

これらのことから、洪水の水位が高い時間帯には浮遊砂の移動距離が長くなることにより、中小規模の砂州群が合体して大規模な砂州が形成される。一方、洪水減水期には浮遊砂の移動距離が短くなり、比高の高い砂州に堆積することで砂州が分裂し、洪水前のような波長や配置の網状砂州に戻り、斐伊川の網状砂州の変形・発達には浮遊砂の挙動が支配的であることが分かる。

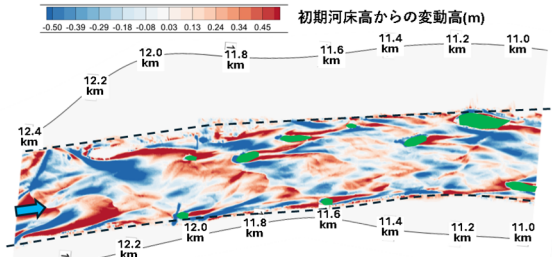
次に、従来の洪水流・河床変動解析法と比較する。流れの解析は本研究で用いたQ3D-FEBSを用い、河床変動解析は従来の掃流砂に芦田・道上式、浮遊砂に板倉・岸の平衡浮遊砂濃度式を底面境界条件とした3次元移流拡散方程式を用いた(以下、従来法と呼ぶ)。図-9は、従来法による洪水後の解析河床形状コンターを示す。従来法は流れの解析にQ3D-FEBSを用いているため、図-6(d)に示した本解析法の結果と比較的近い結果となっている。しかし、図-10に示す従来法による掃流砂・浮遊砂の縦断分布より、従来法による浮遊砂量は、図-8に示した本



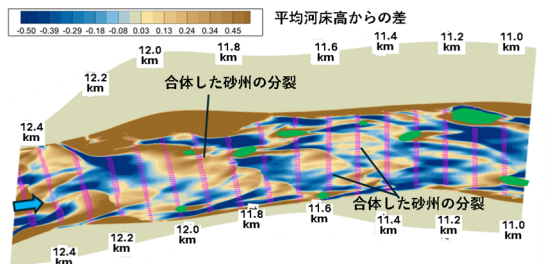
(a) 洪水減水期(7/13 10:00)の解析河床形状



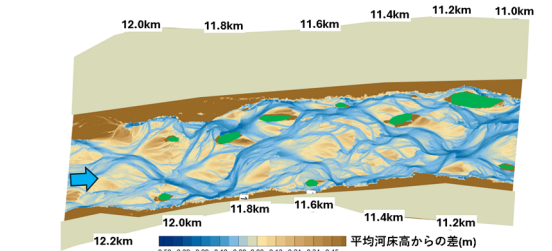
(b) 洪水減水期(7/13 10:00)の底面浮遊砂濃度



(c) 洪水減水期(7/13 10:00)の河床変動高



(d) 洪水後の解析河床形状



(e) 洪水後の実測河床形状

図-6 砂州の分裂段階における浮遊砂運動と砂州の挙動

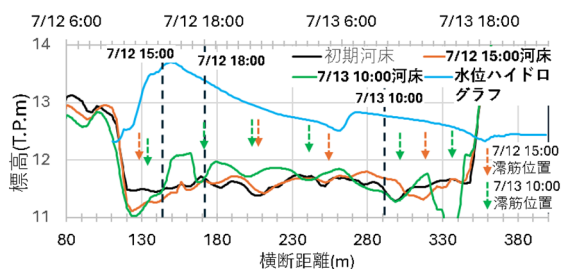


図-7 12.0kmの水位と河床高の時間変化の関係

解析法による浮遊砂量よりも少なく計算されている。このため、従来法の洪水後の河床形状(図-9)は、実測の洪

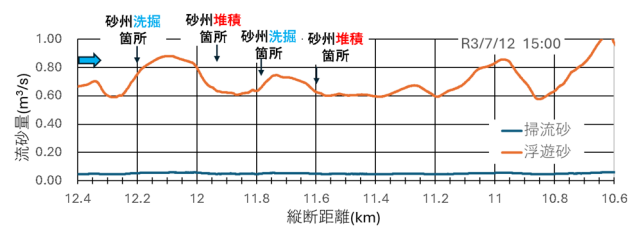


図-8 本解析法による洪水ピーク時(7/12 15:00)の掃流砂量・浮遊砂量の縦断分布

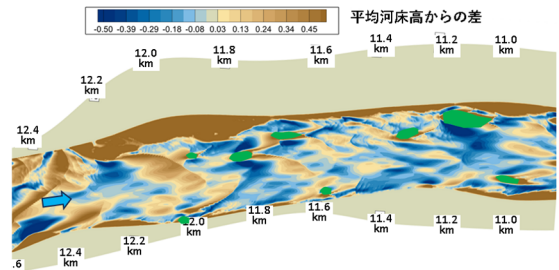


図-9 従来法による洪水後の河床形状の解析結果

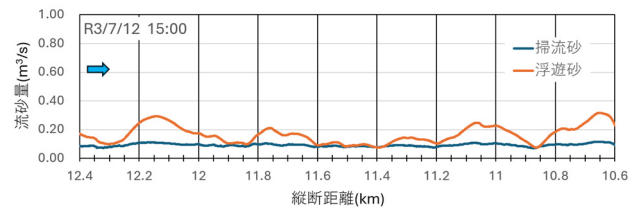


図-10 従来法における洪水ピーク時の掃流砂量・浮遊砂量の縦断分布

水後の河床形状(図-6(e))や本解析結果の河床形状(図-6(d))と比べて砂州の変形・移動距離が小さく計算されている。

図-11は、本解析法における詳細計算の洪水ピークから1時間後(7/12 16:00)の12.0km付近の砂堆の発達状況を示す。解析結果は、図-11(a)は宇民らと同様に平滑化河床からの偏差成分を示している<sup>4)</sup>。解析では、洪水ピーク付近の時間帯から、波長2.5m程度で波高0.2m~0.4mの砂堆が形成されている。宇民らの計測結果では、平均波高が約0.3mで平均波長が約5mとなっており<sup>4)</sup>、解析結果は波高については宇民らの実測値と対応するものの、波長は半分程度になっている。今後、音響測深機等による洪水中の河床形状の観測を行い、解析法を検証する必要がある。

図-12は、図-11(b)の赤枠内の緑線上の縦断河床高と流れ場、土砂移動状況を示す。砂堆周辺の流れと土砂移動については、砂堆のCrest付近で底面流速が加速されることで(図-12(a)), 砂堆のCrest付近で河床からの離脱量が多くなっており(図-12(c)), 砂堆のLee Side付近からStoss Sideの上流付近にかけて乱れエネルギーが大きくなることで(図-12(b)), この付近で掃流砂から浮遊砂への遷移量が大きくなっており(図-12(d)), これらの結果は、砂堆上の流速と乱流、掃流砂・浮遊砂の挙動等を計測したNaqshbandの結果<sup>8)</sup>と対応している。解析の浮遊砂量は、砂堆のStoss SideからCrest部に向けて掃流砂への遷移量が増加することで縦断的に減少し(図-12(d)(e)), その結果、

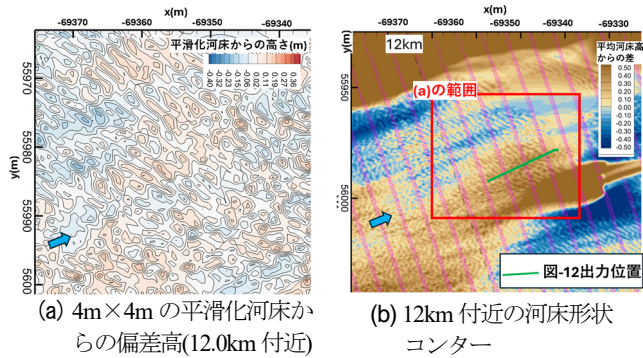


図-11 本解析法の詳細計算における洪水ピークから1時間後 (7/12 16:00)の砂堆の解析結果

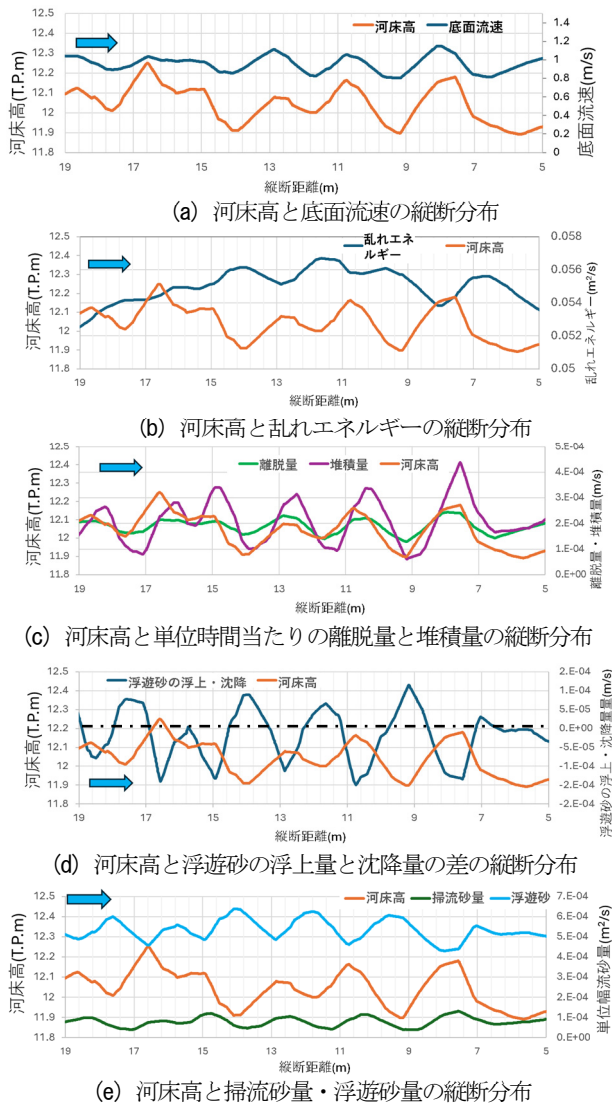


図-12 砂堆上の縦断河床高と流れ場、土砂移動状況

Crest部付近での掃流砂の増加させている。掃流砂はCrest部付近で増加した後、その直下流で堆積し(図-12(c)(e))、砂堆の波高を増加させるとともに、砂堆を下流に移動させている。以上より、斐伊川の洪水時の砂堆は河床形状の変化と流れ、それに伴う掃流砂・浮遊砂運動が相互に影響し発達・減衰していることを示した。

## 4. 結論

本研究では、掃流砂と浮遊砂を一体的に解析する準三次元洪水流・河床変動解析(Q3D-INEBS)を、斐伊川下流部に適用し、以下の結論を得た。

- ・解析結果より、洪水時の水位の高い時間帯には、浮遊砂の移動距離が長くなることで、中小規模の砂州を合体させながら大規模な砂州が形成された。一方、洪水減水期において、水深1m程度を下回ると浮遊砂の移動距離が短くなり、比高の高い砂州に浮遊砂が堆積することで結果的に砂州が分裂し、斐伊川で平常時に見られる中小規模の砂州が形成されることを示した。このように、斐伊川の網状砂州の挙動には、浮遊砂の運動が支配的であることを示した。
- ・砂堆の発達変形には、流れと河床形状、それに伴う掃流砂と浮遊砂の運動が相互に影響していることが分かった。今後、洪水時の砂州と砂堆の挙動の計測し、解析法の検証を行う。

## 参考文献

- 1) 竹村吉晴, 福岡捷二: 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019.
- 2) 長谷部夏希, 後藤岳久, 福岡捷二, 榊井正将: 掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法の開発と昭和56年8月石狩川洪水への適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.78, No.2, pp.1\_967-1\_972, 2022.
- 3) 後藤岳久, 後藤勝洋, 加藤宏季, 福岡捷二: 大規模洪水時における砂州の発達に伴う洪水流の三次元エネルギー分布の変化に基づく河川構造物の被災機構, 第12回河川堤防技術シンポジウム, p.33-36, 2025.
- 4) 宇民正, 上野鉄男, 木下良作, 松本直也, 室元孝之: 斐伊川における洪水流況と河床形状の同時計測, 水工学論文集, 第38巻, pp.739-746, 1994.
- 5) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集B1, Vol.68, No.1, pp.1-20, 2012.
- 6) 関根正人, 小川田 大吉, 佐竹宣憲: Bed Material Load の流送機構に関する研究, 土木学会論文集, No.545, II-36, pp.23-32, 1996.
- 7) 瀬津家久: 開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第261号, pp.67-76, 1977.
- 8) Naqshband, S., J. S., Ribberink, D., Hurther, and S. J. M. H. Hulscher: Bed load and suspended load contributions to migrating sand dunes in equilibrium, *Journal of Geophysical research*, Vol. 119, Issue 5, pp.1043-1063, 2014.

(2026. 4. 2受付)