

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15102

研究課題名(和文) 流れと流砂の二相流的非平衡運動を考慮した新しい河床変動解析法の開発

研究課題名(英文) Development of bed variation analysis method considering two-phase non-equilibrium motions of flow and sediment

研究代表者

後藤 岳久 (Gotoh, Takahisa)

中央大学・研究開発機構・機構准教授

研究者番号：70634682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず、流れと流砂運動を二相流的に扱うことで掃流砂と浮遊砂の非平衡運動を考慮した新しい河床変動解析法を開発し、これを掃流砂と浮遊砂が生じる橋脚周辺の移動床実験に適用し、橋脚前面及び周囲の洗掘、橋脚背後の堆積を説明した。

一方、実河川は混合粒径であるため、実河川において、粒径毎の流砂の運動方程式を流れとの相互作用を考慮して計算することは困難であることから、本質を失わない範囲で上記解析法を簡略化し、浮遊砂の卓越する石狩川河口部の昭和56年8月洪水に適用した。これにより、従来説明出来なかった複断面的蛇行流れに伴う3次元的な流れと浮遊砂運動、河床変動を説明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来は掃流砂と浮遊砂を別個に評価していた河床変動解析法に対して、乱流場を考慮した粒子の運動方程式を解析することにより、乱れの作用により掃流砂から浮遊砂へ遷移する過程を評価し、掃流砂と浮遊砂の運動を一体的に扱う新しい河床変動解析法を開発している。

これにより、細粒土砂の多い河川で克つ土砂移動の非平衡性の強い河口付近の河床変動や河床波の発達・変形、構造物周辺の河床変動等を、より力学的に忠実に流れと土砂移動現象を理解することが出来、今後の対策の検討にも応用できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a new riverbed deformation analysis method that considers the non-equilibrium motion of bed load and suspended sediment by treating flow and sediment movement as a two-phase flow. It was applied to the movable bed experiment with the bridge pier, and the scouring in front of and around the pier and the sedimentation behind the pier were explained.

However, since actual rivers have mixed grain sizes, it is difficult to calculate the sediment motion equation for each grain size in consideration of the interaction with the flow.

Therefore, the developed calculation model was simplified and applied to the August 1981 flood at the mouth of the Ishikari River, where suspended sediments were predominant. As a result, it was able to explain the three-dimensional flows, suspended sediment movements and bed variations due to compound meandering channel flows.

研究分野：水工学

キーワード：掃流砂 浮遊砂 河床変動解析 準三次元解析 非平衡流砂モデル

1. 研究開始当初の背景

近年、大規模な山地崩壊等によって大量の細粒土砂が一気に河道内に流入し、河道内で大規模土砂堆積や流路の蛇行パターンを変化させるなど河道の状況を一変させ、河岸侵食や護岸崩壊、破堤等の大きな被害が頻発している。このような大量の土砂流入に伴う河川災害を防ぐためには、洪水時に大量の細粒土砂が流入した場合の河道内の土砂堆積や、流路の蛇行パターンの変化を適切に予測する河床変動解析法の開発が求められる。

これまで砂河川を対象とした洪水流・河床変動解析においては、平面二次元洪水流解析に掃流砂と平面二次元移流拡散方程式により浮遊砂を考慮した洪水流河床変動解析法が広く用いられてきた。しかし、平面二次元洪水流解析に基づいた浮遊砂の計算は、浮遊砂濃度の鉛直分布を平衡状態(Lane-Kalinske 分布等)と仮定しているため、湾曲部や分合流部等の三次元的な非平衡流れの河床変動を十分再現出来なかった。近年は、流れの準三次元解析法等により広域の地形を考慮した流れ場を精度良く計算し、得られた三次元流況から浮遊砂濃度の三次元移流拡散方程式を用いて河床変動計算の精度を高めてきている。しかし、三次元移流拡散方程式の底面境界条件となる浮遊砂の巻き上げ量については、河床付近の流れと流砂運動を平衡状態と仮定しているために、実河道の非平衡流砂運動をそれに伴う大規模な河床変動を十分説明出来ないことが課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、まず、底面付近の流れと流砂運動の非平衡性を考慮するため、掃流砂と浮遊砂、底面付近の流れの相互作用を取り込んだ準三次元洪水流・河床変動解析法の開発している。(解析法1)

一方、実河川の河床は混合粒径であるため、粒径毎の流砂の運動方程式を流れとの相互作用を考慮して計算することは極めて困難であったことから、本質を失わない範囲で上記解析法を簡略化し、乱れの作用により掃流砂が浮遊砂へ遷移する過程を新たにモデル化することにより、流砂の非平衡運動を考慮し、掃流砂と浮遊砂を一体的に計算する新しい準三次元洪水流・河床変動解析法の開発している。(解析法2)

3. 研究の方法

解析法1

図-1 は本解析法の主な変数の定義と考え方を示す。本解析法では、解析領域を鉛直方向に3分割している。底面付近では、流れと流砂の運動を2相流的に解析する(掃流層領域)。底面付近より上層では、準三次元解析法により流れを解析する(準三次元領域)。そして、準三次元領域と掃流層領域を接続する流れ場を解析する領域として接続領域を考える。それぞれの領域間では、図-1 に示すように鉛直方向流れに伴う質量、運動量の交換を考慮し、領域間に作用するせん断力は計算された流速鉛直分布を用いて評価することで、領域間における相互作用を考慮する。

具体的には、準三次元領域では、水深積分の連続式と運動方程式に加え、接続領域の上面の流速 u_{ii} を運動方程式により解析し、三次元的流れ場を評価する。掃流層領域については2相流的に解析しており、流れと掃流砂の運動方程式・連続式をそれぞれ計算している。また、浮遊砂の巻き上げを評価するためには、乱れの鉛直成分が重要であることから、乱れ強度の輸送方程式を計算し、掃流層内の乱れの非平衡性を計算している。浮遊砂の巻き上げ量は、鉛直方向流速と計算された乱れの鉛直成分を用いて、砂粒子の鉛直方向運動方程式により評価する。接続領域の流れの解析は、掃流層領域と同様に流れの運動方程式・連続式に加え、乱れ強度の輸送方程式を計

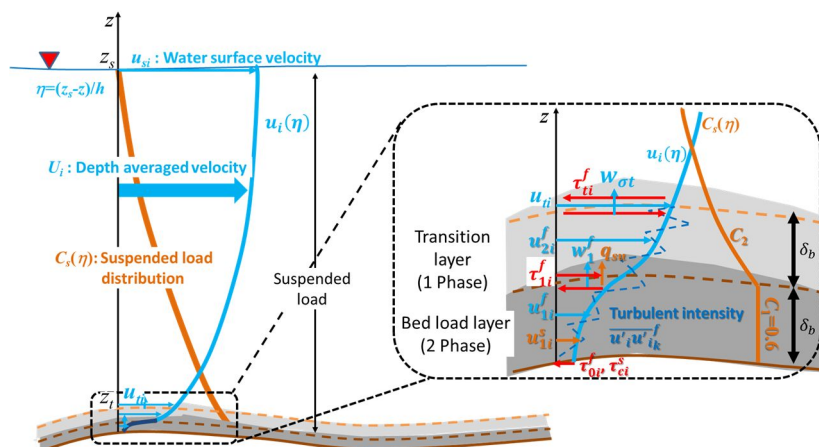


図-1 解析法1の枠組み

算する。

本研究では、構築した本解析法を円柱橋脚周りの流れと河床変動の実験（福岡ら，1997）に適用し、本解析法の妥当性・有効性を明らかにした。検討結果を4章に示す。

解析法2

図-2(a)は本解析における洪水流解析法の枠組みと、用いた流速と乱れエネルギーの鉛直分布を示す。本解析では水深積分モデルの枠組みで非静水圧の三次元流れを解析出来る準三次元解析法(Q3D-FEBS法，竹村・福岡，2019)を用いる。さらに、浮遊砂の輸送が卓越する場の解析には乱流場の評価が重要であることから、水面と底面、水深積分の乱れエネルギーの輸送方程式を導入し、乱れエネルギーの鉛直分布を解析する。

図-3は本解析における河床変動解析法の枠組みを示す。本解析では、流砂運動を Euler 的に扱い、掃流砂・浮遊砂ともに粒子に関する運動方程式と連続式を計算することで両者の非平衡運動を評価する。具体的には、図-2(b)に示すように、掃流砂については、粒子が河床底面付近を跳躍運動している状態と仮定し、跳躍運動に基づく粒子の運動方程式により掃流砂の平均移動速度を解析する。浮遊砂については、流れの乱れ成分が浮遊砂の運動に対して支配的であると見做し、流れの乱れ成分による流体力を付加した粒子の運動方程式により、その平均移動速度を解析する。そして、河床付近で両者を共通の連続式で計算することにより、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う。

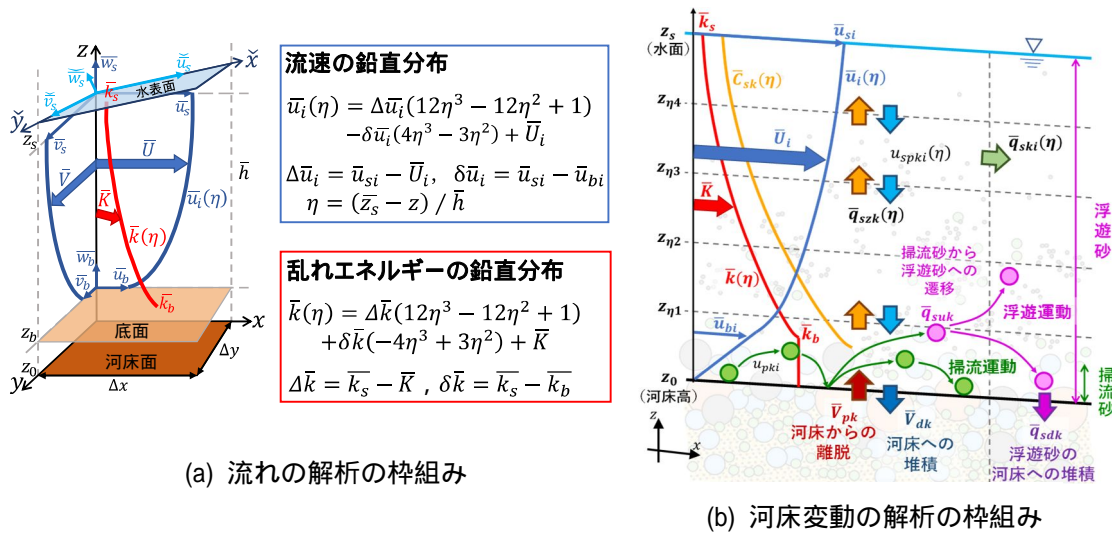


図-2 解析法2の枠組み

4. 研究成果

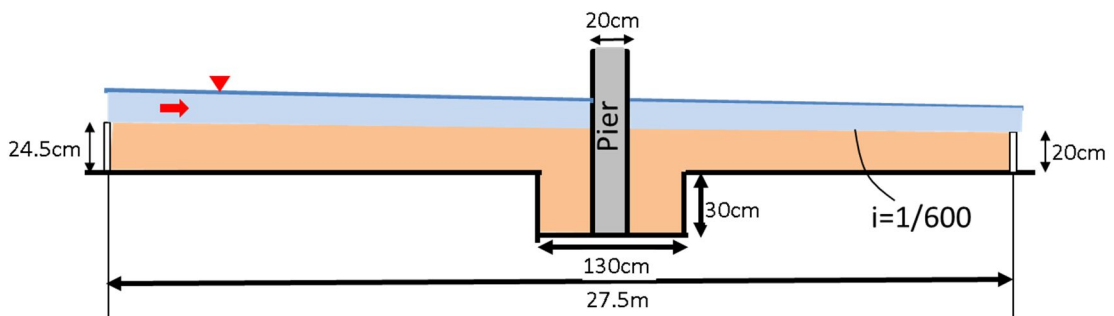


図-3 円柱橋脚周りの流れと河床変動の実験(福岡ら，1997)

本研究では、まず、構築した解析法1を円柱橋脚周りの流れと河床変動の実験（福岡ら，1997）に適用した。図-3は、福岡らによる円柱橋脚周りの河床変動の実験の水路の縦断図を示す。水路長は27.5m、水路幅は1.5m、初期河床勾配は1/600である。円柱橋脚の直径は20cmであり、水路下流端から10.5mの位置に設置されている。河床に敷きつめた材料の粒径は0.8mmである。上流端から90L/sの流量を通水し、上流端付近の河床が平衡になるように給砂が行われている。

図-4は、実験の底面付近の流速と解析の接続層上面の流速を比較している。解析結果は、実験値における橋脚上流の底面での逆流域の範囲を説明出来ているが、橋脚下流の底面での剥離域の範囲は実測値よりも広く計算されている。

図-5(a)は実験結果の河床変動コンターを示し、図-5(b)は、本解析法において、掃流層厚を粒径の2倍とした場合の河床変動と掃流層内の流速ベクトル解析結果をそれぞれ示す。ここで、それ

それぞれの解析結果は、橋脚前面の河床洗掘がほぼ安定した通水 20 分後の結果を示している。図-5(b)より、解析結果は実験結果に比べて橋脚前面での洗掘深が大きいものの、橋脚前面から背後にかけての河床洗掘の特徴を説明出来ている。

図-6 は、本解析法において、掃流層厚を粒径の 2 倍とした場合の水路床高のコンター図と掃流砂の粒子速度の解析結果を示し、図-7 は同条件とした場合の解析結果における浮遊砂の浮上量のコンター図を示す。図-6 より、橋脚の背後では、橋脚前面および側面での河床洗掘に伴い、流砂が水路床の高い所から低い深掘れ部に向け動いている。図-7 より、深掘れ部に集まった土砂は浮遊砂として巻き上げられている。本解析法では、流砂の運動を力学的に解析することにより、同心円状に洗掘する円柱橋脚周辺の河床変動を説明している。一方、橋脚の下流の堆積域の流れおよび剥離範囲は適切に計算出来ていない課題を残している。

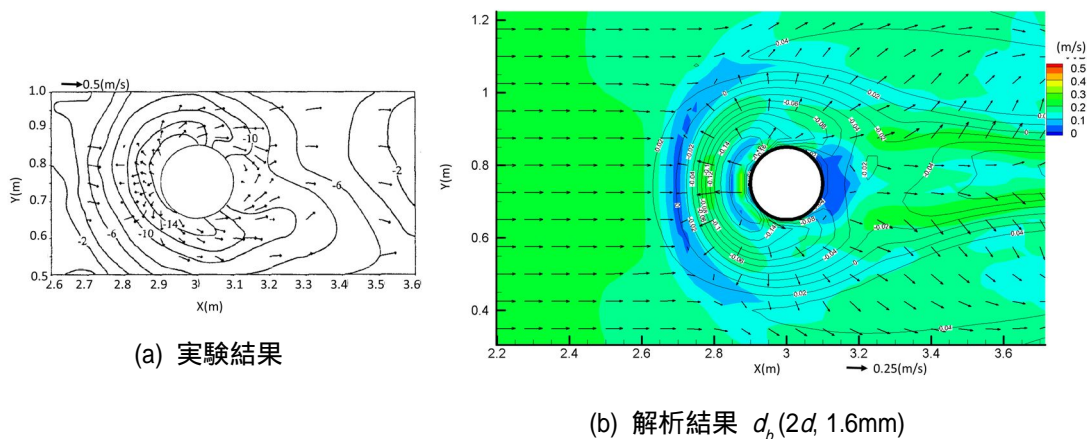


図-4 底面付近の流速分布(実験)と接続層上面の流速(解析)

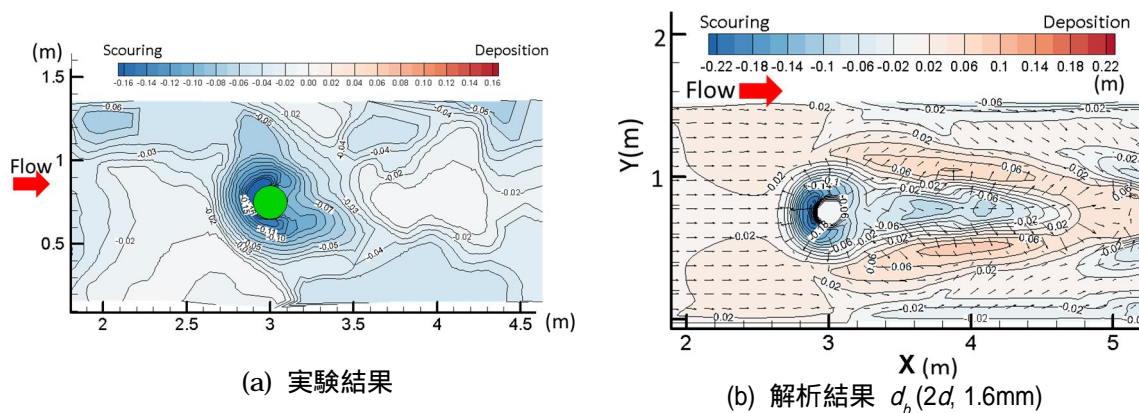


図-5 河床変動の実験結果と解析結果

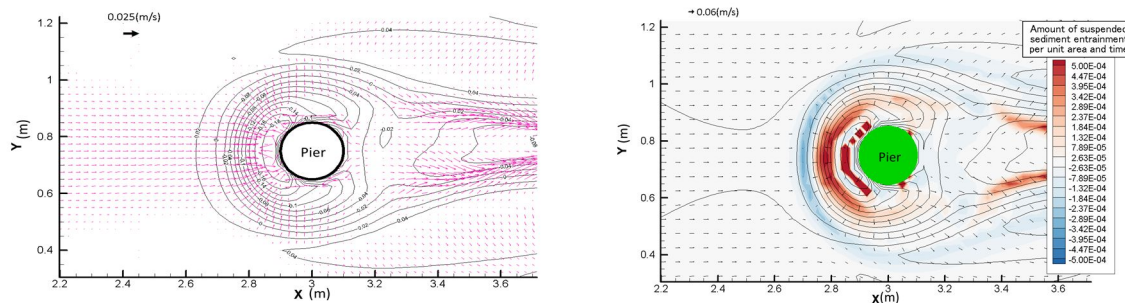


図-5 掃流砂の平均粒子速度のベクトル

図-6 浮遊砂の浮上量の分布

本研究では石狩川の 15km から河口沖-2km とし(図-7), 対象とした昭和 56 年 8 月石狩川洪水は当時の計画を超える大洪水である。北海道開発局は河口部において、図-7 に示すような洪水水面形時系列、流量、河床形状等の大規模な観測を行った。本研究では、この貴重な観測データを検証データとして用いる。図-8 は実測の粒度分布と解析に用いた河床材料粒度分布を示し、解析では実測のように下流区間の河床材料が細くなるような粒度分布を与えた。

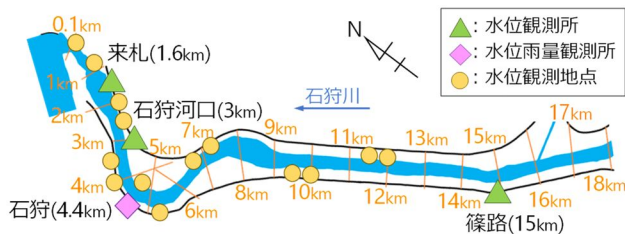


図-7 石狩川河口部の昭和 56 年 8 月洪水の観測体制

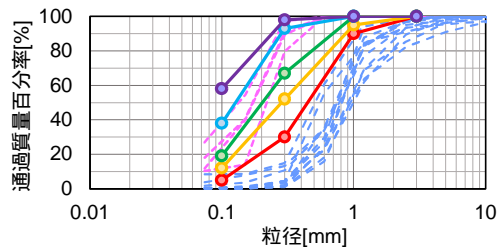


図-8 実測と解析の河床材料粒度分布

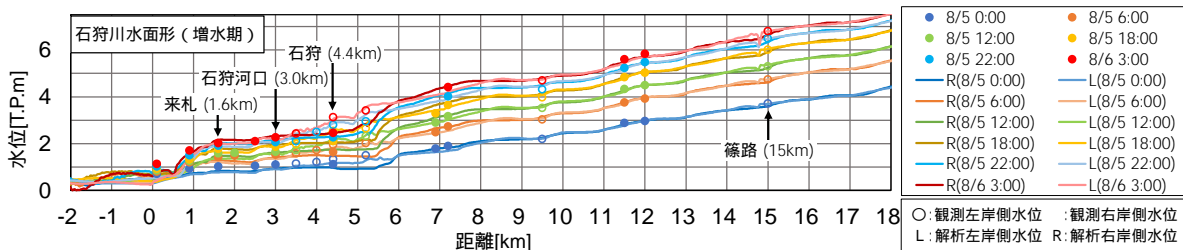


図-9 観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

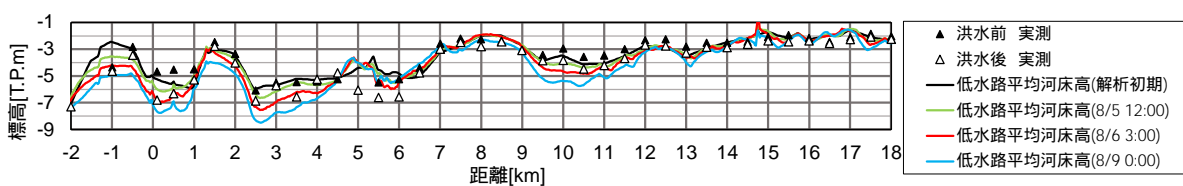


図-10 洪水前後の実測と解析の低水路平均河床高の縦断分布の比較

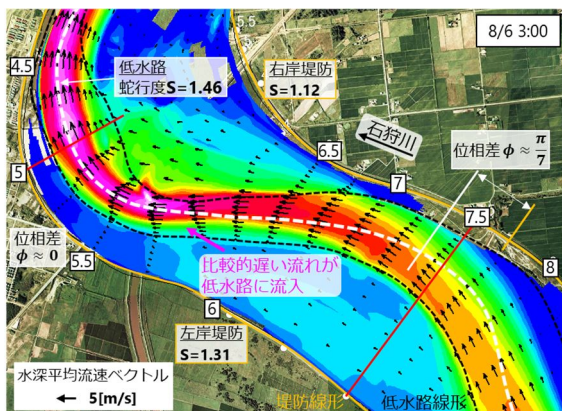
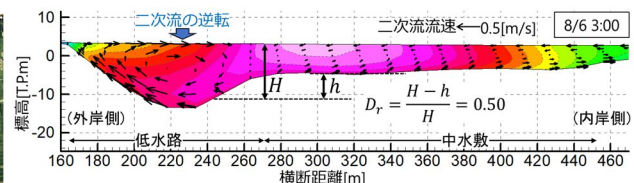
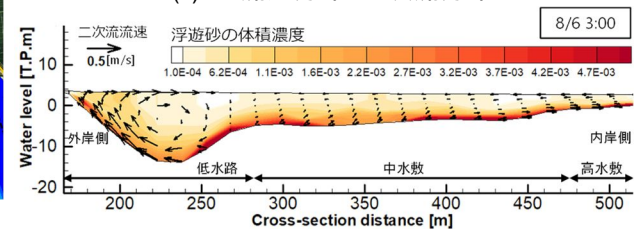


図-11 複断面蛇行区間の洪水ピーク時の水深平均流速分布



(a) 主流速分布・二次流分布



(b) 浮遊砂濃度分布

図-12 5.0km における洪水ピーク時の主流速・二次流分布・浮遊砂濃度分布

図-9 は洪水増水期の観測水面形と解析水面形の比較、図-10 は低水路平均河床高の縦断分布の観測結果と解析結果を示す。解析結果は、観測水面形を再現し、洪水後の実測平均河床高や観測流量をほぼ説明出来ている。

図-11 は洪水ピーク時の水深平均流速分布を示す。また、図-12 は 5.0km 地点の洪水ピーク時における横断面形と主流速のコンター図、二次流流速、浮遊砂濃度分布の解析結果を示す。洪水の水位が低い時間帯では、単断面的蛇行流れとなっており、通常の遠心力による湾曲二次流が生じているが、洪水ピーク付近(相対水深 D_r : 0.42)では、図-11 より、流速の遅い高水敷上の流れが、5.5km 付近で外岸側の低水路の水面に流入している。これにより、5.5km 付近の外岸側の水面流速が減速する一方で、内岸側の流速が速くなり、内岸側を主流が走る複断面的蛇行流れとなっており、横断面内では通常の湾曲二次流とは逆回りの二次流が発生していることが分かる(図-12(a))。そして、洪水減水期には再び単断面的蛇行流れとなり、湾曲二次流が生じている。図-12(b)は 5.0km における二次流流速と浮遊砂濃度の鉛直分布の解析結果を示す。本解析では、前述のように低水路で二次流の逆転が生じ、それに伴い低水路の左岸側で大きな鉛直方向流速が生じており、これにより掃流砂から遷移した浮遊砂が水面付近まで輸送され、発達した浮遊砂濃度分布を形成している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahisa Gotoh, Shoji Fukuoka	4. 巻 22
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahisa Gotoh, Shoji Fukuoka	4. 巻 36
2. 論文標題 Development and application of calculation method for amount of suspended sediment entrainment under non-equilibrium conditions of flows and sediment transports	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 36th IAHR World Congress, 2019	6. 最初と最後の頁 1798-1807
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 後藤岳久, 福岡捷二, 小野伊佐緒
2. 発表標題 浮遊砂と掃流砂の非平衡運動・相互作用を考慮した河口砂州フラッシュと河口テラス形成・発達への解析
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------