太田川放水路下流部に形成された船底形河道の河岸沿い干潟保全のための技術検討

COUNTERMEASURES FOR PRESERVING TIDAL FLATS IN A SHIP-BOTTOM SHAPED CHANNEL OF THE LOWER OTA RIVER FLOODWAY

後藤岳久[1]・福岡捷二[2]・植田　彰[3]
Takahisa GOTOH, Shoji FUKUOKA and Akira UEDA
[1]正会員　博士（工学）　中央大学研究開発機構　機構助教（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
[2]フェロー　工博　Ph.D.　中央大学研究開発機構教授　（同上）
[3] 国土交通省 中国地方整備局 太田川河川事務所 所長(〒730-8530 広島市中区八丁堀3番20)

Since the elevation of flood plains in the lower Ota River floodway is located in the intertidal zone, tidal flats formed on the flood plains have become important as one of river functions. However, the tidal flats are gradually reducing in size due to bed scouring year by year. So, the cross-sectional shape in the lower floodway has changed gradually and naturally to the ship-bottom shaped channels at present from compound channels in the beginning by flood flows. Therefore, it is necessary to design the riprap for protecting against the erosion of the tidal flats. In this study, we evaluate effects of ripraps on the topographic changes and provide appropriately ripraps design by using numerical simulation for flood flows and bed variations in the lower Ota River floodway. Finally, issues to be considered in the design of a ship-bottom shaped channel which are found in the present study are summarized.

Key Words : *preservation of tidal flat, ship-bottom shaped channel, numerical simulation for flood flow and bed variation, riprap, bed scouring, estuary*

1．序論

太田川放水路の河岸沿いには干潟が形成され，汽水生物の貴重な生息・生育・繁殖の場となっている．自然性豊かな干潟を安定的に維持していくことは，太田川の河川管理にとって重要な課題である．太田川放水路の干潟は，その特徴から3つタイプに分類されている[1)]．上流部(2.0~5.6km付近，**図−1**)では内岸側に形成された固定砂州が潮間帯に位置していることから，砂州が干潟となっている．中流部(0.0~2.0km付近)では高水敷が潮間帯に設定されたため，高水敷が干潟化している(**写真−1**)．高水敷干潟前面には低い敷石護岸が設置されており，河道断面形は複断面形を維持しながら安定な干潟形状となっている．一方，下流部(-3.0~0.0km)では中流部と同様に高水敷が潮間帯に設定され高水敷が干潟化しているが，干潟前面に敷石護岸が設置されていないため，洪水流によって徐々に高水敷上の干潟前面が洗掘を受けている[2)] (**写真−2**)．そのため，放水路下流部の干潟は昭和40年の通水開始以来，幾多の洪水を受け，高水敷上の干潟は低水路河床と緩やかに接続した船底形の横断面形となっている（**図−3参照**）．ここで船底形断面河道とは，河道断面がある河道形成流量に対して河岸侵食・洗掘を伴いながら自然の作用によって形成された河道であり，河岸と低水路が滑らかに接続された断面形状をしている．沖積地の自然河川は船底形断面形に近い形状をなしており，その多くは断面形の変化が河道形成流量以下の洪水に対してある変動の幅の中で長期的に収まっている．著者らは，このように自然の作用によって形成された船底形断面形河道がある変動幅の中で変動し，工学的に安定と見なせる河道を安定河道と定義する．このため船底形断形面河道は，流下能力が不足している河道や澪筋化が顕著な河川の河道改修に対して，有効な河道改修断面として考えられている[3)]．**図−2**は，船底形断面形への河道改修のイメージを示す．福岡は複断面河道である札内川が洪水の被災を度々受けることから，どのような断面形が安定かを種々の河道形成流量に対する福岡の式と石礫河川の河床変動解析法によって検討し，安定で流下能力のある河道断面形は，河岸と低水路河床が緩やかに接続した船底形断面形であることを示している[3)]．

自然の営力によって形作られた太田川放水路下流部の船底形断面形は，洪水流による緩やかな砂州の移動により干潟は洗掘を受け，経年的に縮小傾向にある．そのため，敷石護岸を干潟斜面部のどの位置にどの高さで設置

すれば，安定な河道断面・干潟形状を維持できるかを検討することが求められている．

本研究では，太田川放水路下流部の船底形断面形河道に形成された河岸干潟について，干潟保全のための敷石護岸の適切な設置位置や設置高さについて検討する．そして，船底形河道の断面設計や維持管理のための技術について論述する．

２．太田川放水路下流部の河道形状の経年変化

図-3は，太田川放水路の-3.0km～2.0km区間(中下流部)の現況河道の河床高コンターおよび代表断面(-0.8km)の河道横断形状の経年変化を示す．この区間の放水路建設は，元々流れていた福島川の河道中央部付近を浚渫し，河岸沿いは高水敷として掘り残したため[1]，干潟は掘り残した高水敷にのみ存在している．低水路澪筋部には約1km波長の交互砂州が形成されており（**図-3(a)**），交互砂州の変動の幅(2m～3m)で，経年的にほぼ安定な河道形状となっている[1]．これらの交互砂州の高さは最干潮位(-2.0T.P.m)より低いため，干潮時においても干出せず，常に水面下に没している．一方，河岸斜面については，放水路概成後から今日までに幾多もの洪水を受け，低水路河床の変動が河岸沿い干潟の接続部を徐々に低下させており，低水路澪筋部と河岸が緩やかに接続した船底形の河道に変化している．これら河岸沿いの干潟は低水路より1~3m程度高い高水敷上に位置し，洪水流によって一度洗掘を受けると元の河床高に回復出来ないため，干潟を維持するためには洗掘から守る必要がある．

近年，国土交通省太田川河川事務所は太田川放水路の高水敷上の堤防沿いに緊急用河川敷道路の整備を進めおり（**図-1**），今後の緊急用河川敷道路の整備が河岸沿い干潟の洗掘・縮小を助長する恐れがある．そのため，**写真-1**に示すように干潟前面に敷石護岸を連続的に設置し，干潟を保全する必要がある．次章では，河岸沿いに干潟が形成されている-1.5km~0.0km区間において，敷石護岸の設置位置や設置高さについて検討する．本検討により，今後，流下能力増大のための洪水対策として船底形河道への河道改修が考えられ，その際に課題となる船底形の断面形を安定に維持するための考え方を提示する．

３．河岸沿い干潟の形状変化の推定と干潟保全策

本章では，最初に現況の船底形河道の干潟が今後どのように変形するかを推定し，干潟保全のための敷石護岸の設置位置について干潟形状・河道断面の安定性を検討する．次に，決定した敷石護岸に対し緊急用河川敷道路の設置の影響について検討する．尚，河岸沿い干潟は両岸共に減少傾向であるが，緊急用河川敷道路は左岸のみ延伸されることから，左岸干潟のみの敷石護岸設置について検討し，右岸側については今後の課題とする．

図-1 太田川デルタ（2007年撮影）

写真-1 0.2kmより上流区間の敷石護岸と緊急用河川敷道路

写真-2 0.0kmより下流における干潟

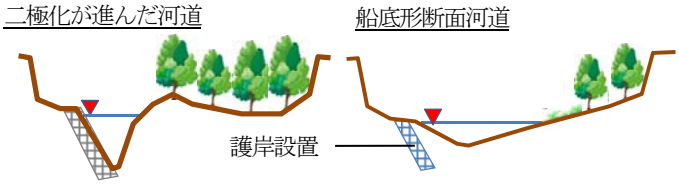
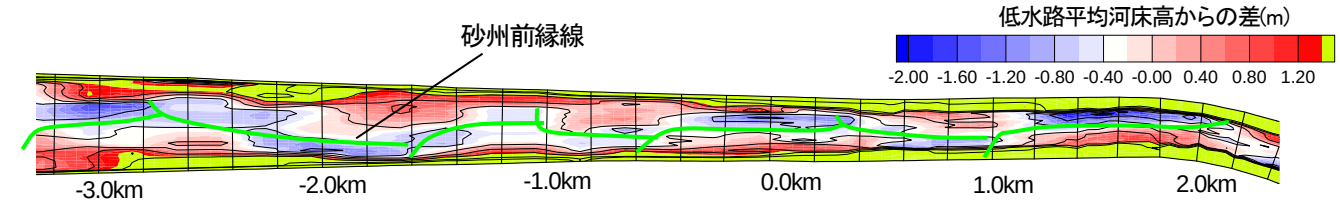
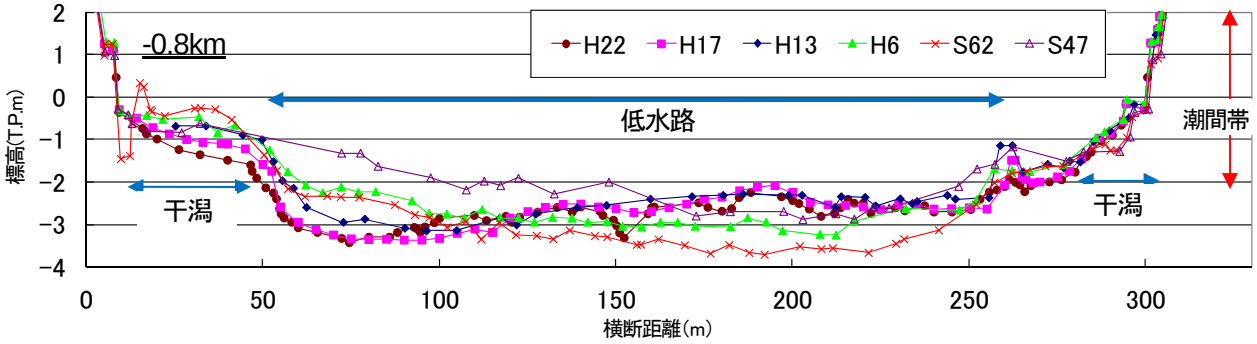


図-2 船底形河道への改修と護岸設置のイメージ

解析方法は既往論文[2)4)]に示されているので，簡単に示す．太田川放水路は，デルタ河川網を構成する河川の一つであり，太田川放水路の解析のためには境界地点の流入流量・水位ハイドログラフ・流速分布等を適切に評価する必要がある．著者らは洪水中に観測された水面形時系列データには，そこで生じている全ての水理現象が現れていると考え，観測水面形時系列データを用いた非定常準三次元洪水流・河床変動解析を構築し，太田川デルタ河川網の洪水流量配分と洪水中の河床変動を明らかにした[4)]．さらに，河岸干潟周辺の河床変動を適切に評価するため，デルタ河川網全体を解く解析領域と干潟周辺の小領域の解析領域を設け，干潟周辺の計算領域の境界条件に大領域の計算結果を与える1way方式により洪水流・河床変動解析を行い，過去30年間の河岸沿い干潟の経年変化を説明した[2)]．ここで，本解析法の洪水流解析の基礎式は，水深積分渦度方程式と浅水流方程式により底面流速を求める内田・福岡の方法であり[5)]，この解析

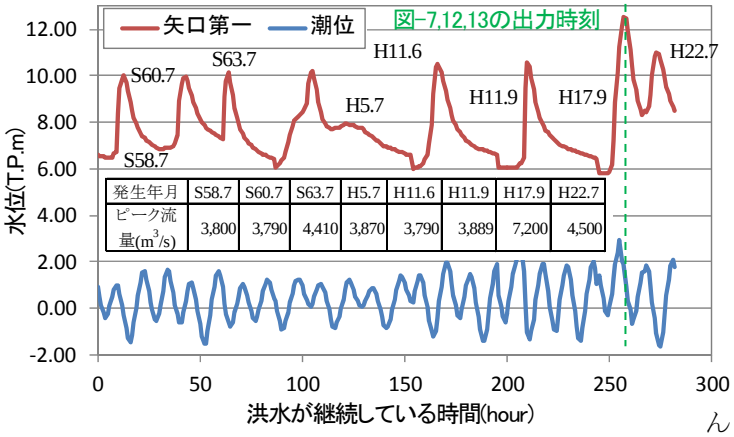


(a) 平成22年における河床高コンター



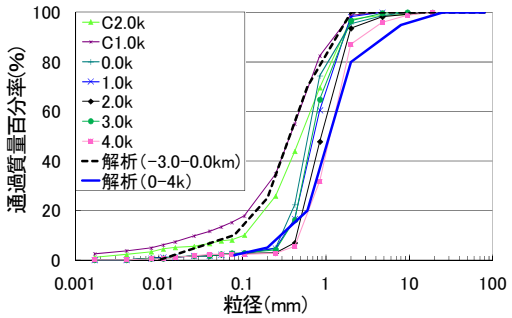
(b)−0.8kmにおける河道横断形状の経年変化

図−3 太田川放水路における河道縦横断形状の特徴



発生年月	S58.7	S60.7	S63.7	H5.7	H11.6	H11.9	H17.9	H22.7
ピーク流量(m^3/s)	3,800	3,790	4,410	3,870	3,790	3,889	7,200	4,500

図−4 洪水外力条件



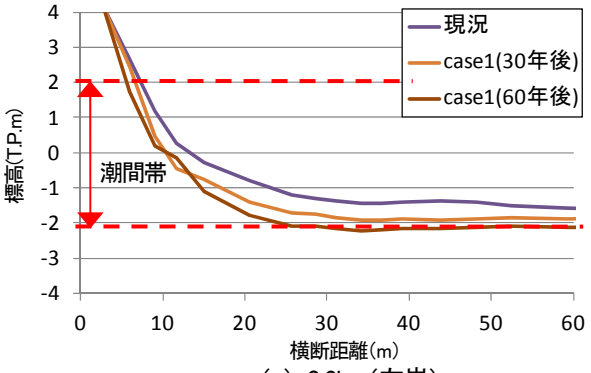
図−5 太田川放水路における河床材料粒度分布

法では浅い流れの仮定を用いないため，得られた斜面部の底面流速により斜面部の浸食を適切に評価できる．これまでの河道安定[6]や河岸侵食[7]の研究では，断面形状の仮定や浅水流の仮定により，河岸斜面の流れと河床変動が適切に評価できていなかった．河床変動解析の基礎式は，流砂の連続式，粒径別連続式，芦田・道上による粒径別平衡流砂量式，浮遊砂の鉛直濃度分布は平衡状態を仮定したLane-Kalinskeの濃度分布式である．小領域の解析格子サイズは縦5m×横0.7~2m程度とし，これにより河岸・護岸形状を評価した．護岸に対応する解析格子では，護岸高より低下しないようにしている．洪水外力条件は昭和58年9月洪水から平成22年7月洪水までの過去30年間に生じた主要8洪水を繰り返し(30年×2)与えた．この洪水外力条件は，交互砂州が1波長以上の距離を流下する期間に相当する．**図−4**は洪水外力条件と潮位条件，観測流量を示す．ここで，表中のピーク流量は，矢口第一観測所 (11.6km)における実測流量である．**図−5**は，太田川放水路における河床材料粒度分布である．検討区間の河床材料は，d_{60}が0.4~0.8(mm)程度の細砂で構成されている．また，河床材料の粘着性は河床変動に対してほとんど影響しない[1]．

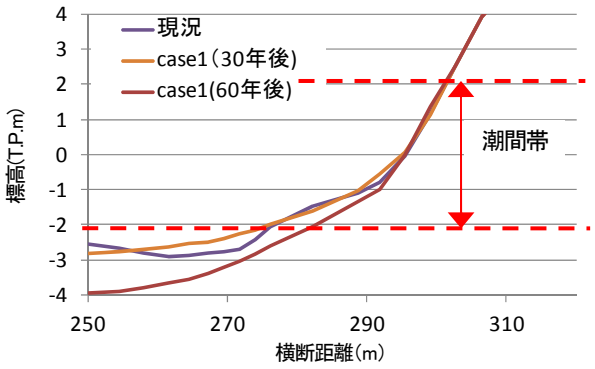
(1) 現況干潟の縮小化の推定とその対策の検討

ここでは，現況河道において過去30年間の洪水を繰り返し(30年×2)通水した場合について検討する(Case1)．**図−6**は，干潟付近の横断形状の解析結果を示す．河岸沿いの現況干潟は，船底形の横断面形状を保ったまま徐々に河床高が低下する．これは，河口付近で河床材料が細砂であることから，河岸においても土砂移動が生じ，緩やかな横断勾配によって土砂が澪筋方向に運ばれるためである．このように河岸斜面上の洗掘と低水路河床の変動が相互に影響及ぼし合うことで，横断面形は低水路河床と緩やかに接続した船底形となっている．しかし，放水路の干潟を保つためには，河岸高さを潮間帯の高さで維持する必要があり，干潟保全のための護岸設置位置について検討する．

図−7は平成17年9月洪水を通水した場合の洪水ピーク時の無次元掃流力分布を示し，**図−8**は敷石護岸の設置位置案を-0.8kmの横断図上に示す．平成17年9月洪水(ピーク流量7200 m^3/s)は，計画高水流量規模(8000 m^3/s)に相当する洪水である．**図−7**には敷石護岸の設置位置案に対応する-2.1(T.P.m)，-1.5(T.P.m)の等高線を重ねて示してい

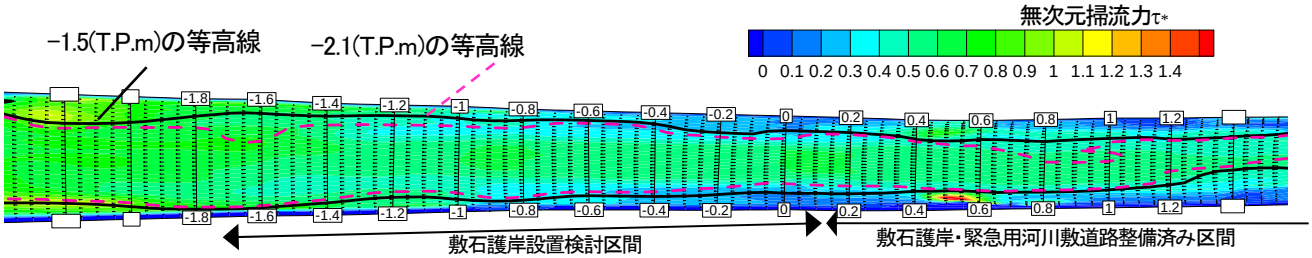


(a)−0.2km(左岸)



(b)−0.6km(右岸)

図−6 今後予測される現況河道の干潟形状の変化

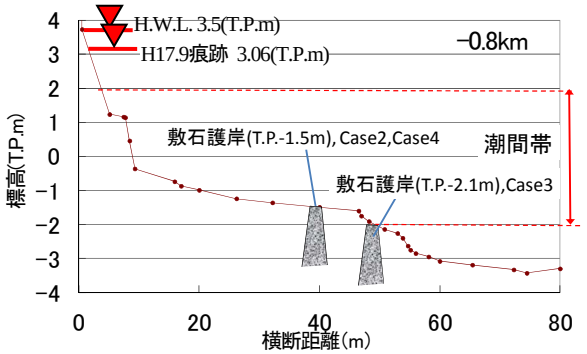


図−7 平成17年9月(既往最大)洪水を通水した場合における無次元掃流力(洪水ピーク時)

る．図−7より，洪水ピーク時の低水路における無次元掃流力は約0.5~0.7程度であるが，河岸付近は0.1~0.3であることが分かる．-2.1(T.P.m)の等高線付近の無次元掃流力は，0.0km付近において低水路の値とほぼ等しく大きい．一方，-1.5(T.P.m)の等高線付近では，縦断的に無次元掃流力が0.2~0.3程度の範囲で収まっている．この時の沈降速度と摩擦速度の比は，-1.5(T.P.m)の等高線付近で0.5以上であり低水路では0.2程度であるため，-1.5(T.P.m)の高さの干潟上では低水路に比べて浮遊砂の巻上げは少ない[8]．そこでCase2として，現況の干潟高さが-1.5(T.P.m)の位置に敷石護岸を設置した．-1.5(T.P.m)の高さは，アサリが生息出来る下限高さ付近[1]であり干潟の生態環境の面からもこの高さの干潟を守ることは重要である．Case3では，干潟高さが-2.1(T.P.m)の位置で干潟のほぼ前縁に敷石護岸を設置した．以下ではCase2，Case3について検討した．

(2) 敷石護岸設置による干潟保全

本章の検討では，既往研究において精度検証が出来ている過去30年分の洪水を与えた場合の解析結果のみを用いる．図−9は初期河床形状を示し，図−10，図−11は洪水後の河床高コンターを示す．ここで，洪水後とは図−4に示す一連の8洪水を全て通水し終えた後の状態を示している．干潟の最前縁に敷石護岸を設置したCase3では，Case2に比べて干潟上の洗掘量及び洗掘範囲が大きくなっていることが分かる．図−12及び図−13は無次元掃流力分布を示す．Case3では，無次元掃流力が敷石護岸背面および前面で局所的に大きくなっており，干潟上の無次元掃流力も全体的にCase2よりやや大きいため，敷石護岸付近及び全体的に干潟上の洗掘深がCase2より大きくなっている．このため，Case2の敷石護岸の位置を採



図−8 護岸設置位置案

用する．一方，0.1km付近には写真−3に示す試験造成干潟が設置され[1]，造成干潟直下流では1m程度の比高差がある．このため急激な断面形の変化により洗掘が大きくなっている．そこで，Case2の敷石護岸条件について，造成干潟直下流から-0.2kmまでの区間で緩やかに干潟高さに摺りつくようにした場合を検討した(Case4)．図−14は，Case4における洪水後の河床高コンターを示す．摺りつけ部を設けることで，安定な干潟形状が維持されている．以下では，Case4の条件に緊急用河川敷道路を設置した場合の河岸沿い干潟および低水路河床の安定性について検討する．

(3) 緊急用河川敷道路整備後の河岸干潟の安定性

図−15は，緊急用河川敷道路と設定した敷石護岸条件を示す．外力条件は(1)の検討と同様に過去30年の洪水を繰り返し与え(30年×2)，Case4と同じ敷石護岸位置・高さに緊急用河川敷道路を整備した場合(Case5)，敷石護岸の効果について比較するため，緊急用河川敷道路のみを整備し，敷石護岸は設置しない場合(Case6)について比較検討する．

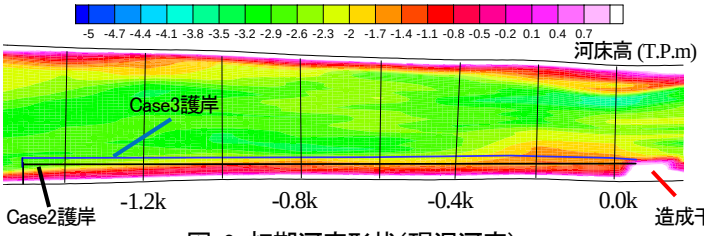


図-9 初期河床形状(現況河床)

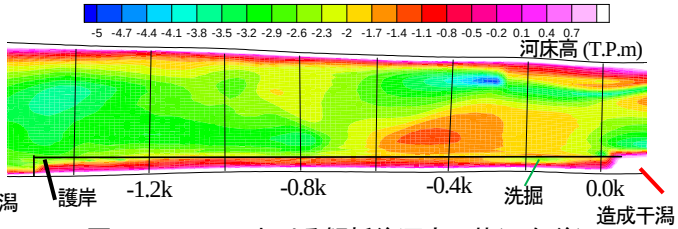


図-10 Case2における解析後河床形状(30年後)

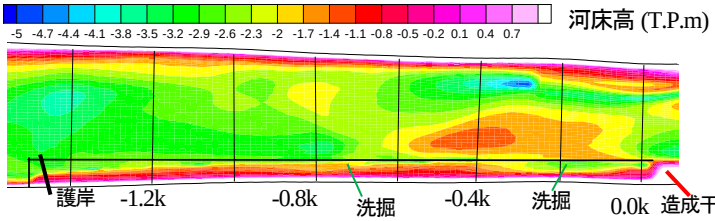


図-11 Case3における解析後河床形状(30年後)

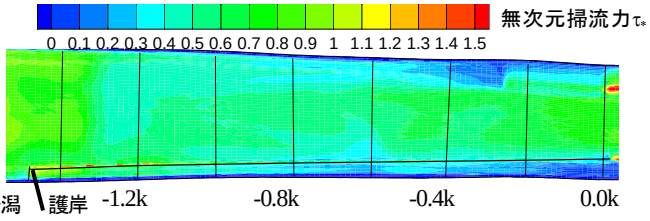


図-12 Case2における無次元掃流力分布

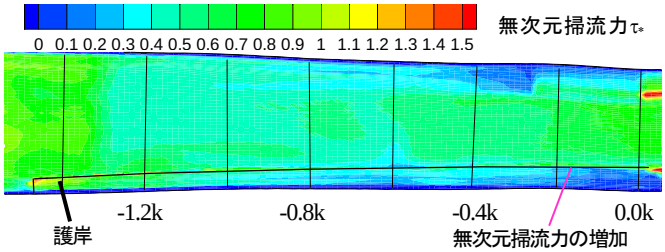


図-13 Case3における無次元掃流力分布

写真-3 造成干潟の直下流(0.1km付近)

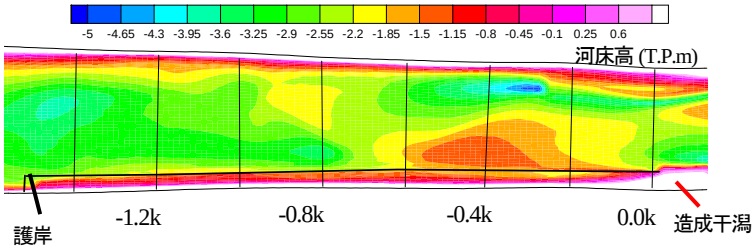


図-14 Case4における河床高コンター(30年後)

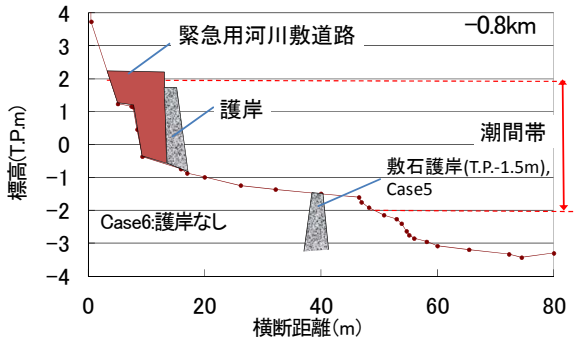


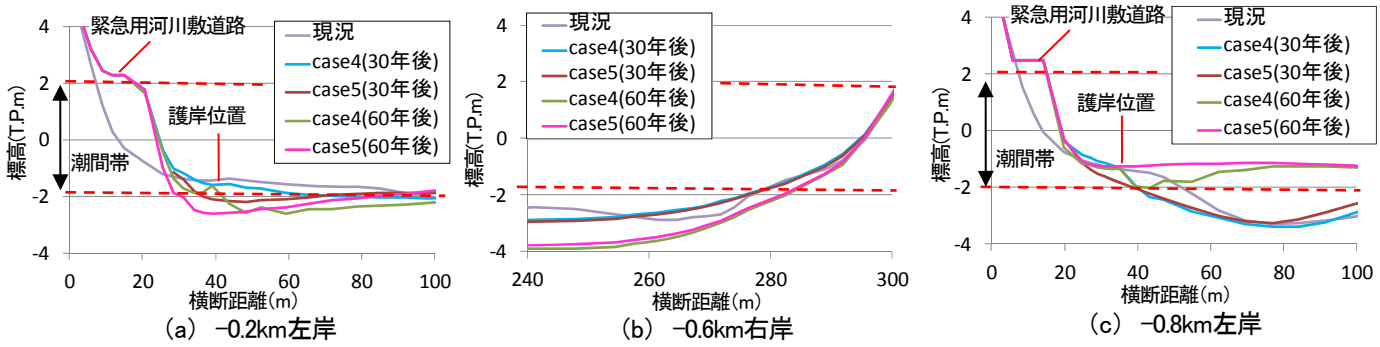
図-15 緊急河川敷道路と護岸設置位置

洪水後の解析横断形状を図-16に示す．Case5における左岸側の干潟は敷石護岸を設置しないCase6に比べて干潟の洗掘が抑えられており，緊急用河川敷道路を整備しても干潟形状をほぼ維持できることが分かる．対岸（右岸）の干潟については，左岸側に敷石護岸を設置しても(Case5)，設置しない場合(Case6)と干潟高さの低下量にほとんど変わらない(図-16(b))．しかし，右岸側の干潟の経年的な縮小自体を抑制する必要があり，右岸干潟の保全策については今後の課題とする．

以上の検討より，太田川放水路下流部では，護岸設置による局所的なせん断力の増加を引き起こさないよう，干潟上の浮遊砂の影響が小さくなるように横断位置を設定し，無次元掃流力の縦断変化が小さくなるような線形として船底形断面形の斜面上に敷石護岸を設置すると，干潟から抜け出る浮遊砂が比較的少なく掃流砂もほぼ一様に流れているため，低水路河床の低下や干潟上の洗掘を生じさせることなく安定な河道・干潟形状を維持できる可能性が高いことが分かった．

4．船底形河道の断面設計への応用

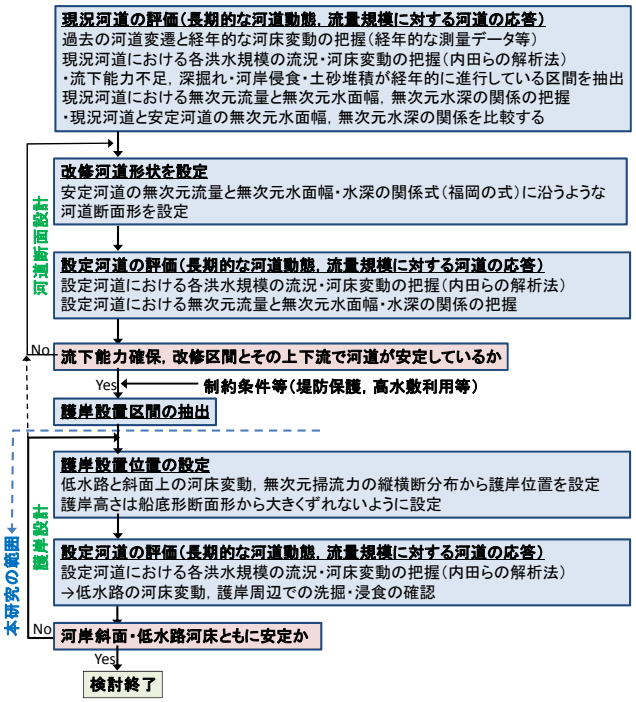
今後，複断面河道の流下能力向上，みお筋化や樹林化の解消等のため，安定な船底形河道への改修が考えられる[3]．そこで，船底形断面形を形成している太田川下流部での検討から得られた知見より，河道断面設計・護岸設置の手順とその留意点・課題等を示す．図-17は河道断面設計・護岸設置の手順を示す．検討手順は，安定な河道断面形の決定と護岸設置位置の決定の二段階で行う．まず，対象河川の河道変遷，工事履歴を調べ，過去の望ましい河道断面形について検討する．そして，現況河道について様々な規模の洪水を対象として洪水流・河床変動解析を行い，流下能力不足や洗掘・堆積が顕著な区間を抽出する．抽出した区間について，福岡の式により現況河道と安定河道の無次元流量と無次元水面幅・無次元水深の関係を比較し，現況河道の断面形を評価する．ここで，洪水流・河床変動解析法には斜面上のせん断力を評価出来る内田・福岡の手法[5]を用いる．次に，抽出した現況河道の課題のある区間について，各洪水規模に対



（a） −0.2km左岸　（b） −0.6km右岸　（c） −0.8km左岸

図−16 洪水後の河道横断形状

して福岡の河幅の式に沿うように断面形を設定する．そして，設定した河道形状に対して洪水流・河床変動解析[5]を行い，河道の安定性について判断する．深掘れが改善されない等，河道が十分安定していない場合には，これらを改善するように再度断面形を設定し，同様の手順を繰り返すことで安定な河道断面形を決定する．一方，河岸侵食・洗掘に対する堤防保護，高水敷の利用等の制約条件から，船底断面形においても護岸設置が必要な場合がある．そこで，断面形決定時の洪水流・河床変動解析の結果から，河床変動の特徴と河床材料，無次元掃流力，浮遊砂の巻き挙げとの関係を考慮して護岸位置を設定する．護岸の高さは，船底形断面形から大きくずれないように設定する．設定した護岸位置に対して洪水流・河床変動解析[5]を行い，斜面と低水路の安定性について検討し，低水路河床の大幅な低下や斜面上の洗掘が見られる場合には，護岸位置を再設定する．これを繰り返すことで安定な河道断面形と護岸設置位置を決定する．今後，蛇行・湾曲部を有する河道において，同様の手順と解析法により，安定河道断面の設計，護岸設置・非設置区間とそれらの接続部の処理について検討する必要がある．



図−17 船底形河道の河道設計・護岸設置検討の手順

５．結論

本研究では，太田川放水路下流の船底形断面形に形成された干潟の保全対策について検討した．本研究の結論を以下に示す．

1) 太田川放水路下流部では，洪水流・河床材料・潮位変動の関係から，河岸付近の河床高が船底形の横断形状を保ったまま徐々に低下している．そのため，敷石護岸を船底形の横断面形状から大きくずれないよう干潟前面に設置することにより，船底形断面形を安定に維持しつつ河岸沿い干潟を保全できる可能性が高いことを示した．

2)船底形断面河道に形成された河岸干潟保全の検討から，今後，船底形断面形に改修する際の河道断面形設計および護岸設置の手順を提示した．本研究成果は，船底形河道を安定に維持するための技術の基礎情報を提供している．

参考文献

1) 太田川放水路河口干潟における生態工学研究：太田川生態工学研究会，2013.
2) 後藤岳久，福岡捷二，宮川勇二：太田川放水路の河岸沿い干潟の洪水流による形状変化，河川技術論文集，第 19 巻，pp.159-164，2013.
3) 福岡捷二：札内川の河道変遷を考慮した治水と環境の調和した安定な河道縦横断形状に関する研究，北海道河川財団研究所紀要(2013 年度版)，2013.
4)後藤岳久，福岡捷二，田中里佳：太田川デルタにおける河川流路網の洪水流と河床変動に関する研究，水工学論文集，第 56 巻，pp. I_1195-1200，2012.
5) 内田龍彦，福岡捷二：底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析，土木学会論文集 B1，Vol. 67, No. 1，pp.16-29，2011.
6) Gary Paker: Rivers with equilibrium banks and mobile bed, Part2, J.F.M., Vol.89, pp.127-146, 1978.
7) 長田信寿，細田　尚，村本嘉雄：河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析法に関する研究，土木学会論文集 II，第 621 巻，II-47 号，pp.23-39，1999.
8) 土砂水理学 1：河村三郎，森北出版，p.293，1982.

（2013. 9. 30受付）