河川技術論文集，第24巻，2018年6月

荒瀬ダムの撤去が直下流域の土砂動態および流れに与えた影響

EFFECTS OF A PARTIAL　DAM REMOVAL ON RIVER BED TOPOGRAPHY　AND FLOW FIELDS

大本　照憲[1]・安達　幹治[2]・平川　隆一[3]
Terunori OHMOTO, Kanji ADACHI and Ryuichi HIRAKAWA

[1]正会員　熊本大学教授　大学院自然科学研究科（〒860-8502熊本市中央区黒髪二丁目39番1号）
[2]学生会員　熊本大学大学院自然科学研究科（同上）
[3]正会員　前橋工科大学准教授　工学部社会環境工学科（〒371-0816前橋市上佐鳥町460番地1）.

Variations in sediment budget, bed topography and flow fields have been investigated in a upstream and downstream reachs of Arase Dam, which was in the final stage of the partial dam removal, in the Kuma river, Kyushu district. A relatively large scale gravel bar, which was newly formed in the down-stream by the flood in June 2015 after the partial dam removal,　has been changed by floods in the rainy season 2016. The results of field survey showed that stable secondary currents of the second kind have existed in main channel of left side of the gravel bar　and　a lentic habitat in subchannel of right side of the bar has lost most of sprig water　through subsurface of the bar by gravel deposition caused by floods in 2016.

Key Words : *dam removal, reservoir sedimentation, secondary current, gravel-bar, Arase dam*

1．はじめに

日本は近代化の過程で河川開発が活発に進められ，とりわけ戦後の高度経済成長期に著しい．特に，水害の頻発，水需要の急増，電力エネルギーの供給を背景として多くのダム建設が行われ，洪水調節，水需要供給，水力発電とその役目を果たし，日本の高度経済成長および社会発展に多大な貢献をしてきた[1)]．しかし，ダムのような大型の河川横断構造物は川が本来有する連続性を遮断し，物理・生物環境の多様性を消失，自然撹乱を抑制する傾向を持つことが指摘されており，さらにその老朽化も進行中である．

ダムは下流河道に対して土砂かん止による河床低下，河床表層のアーマー化を生じさせるほか，流量制御により無水・減水区間の発生などの流況変化を生じさせる．ダム諸問題の解決には時間軸を長く取り，地域性を加味した，治水，利水，環境の視点から総合的に判断するする必要がある．日本においては大規模構造物であるダムを短期間で一斉に撤去することはその影響の大きさから得策では無く，段階的な部分撤去法が妥当と考えられる．

日本では熊本県南部を流れる1級河川球磨川の荒瀬ダムにおいて2012年9月より国内初となるダム撤去が段階的な部分撤去法で実施されている．

荒瀬ダムの直下流域では部分撤去により2015年および2016年の出水に伴い，大規模な砂州が形成された[2)]．砂州の形成は平面二次元河床変動解析による予測では示されていない[2)]．荒瀬ダム直下流においては出水時における強い流れの三次元性により砂州が形成された可能性が示唆されるが，砂州の発生機構は実証されていない．

小林ら[3)]は2015年6月の出水で荒瀬ダム直下流に発達した砂州に対して，水生生物の生息場としての河床地形，平水時の流速，砂州下層の伏流水による湧水が底生生物群集に与える影響について検討している．

大本・平川[4)] は，荒瀬ダムが撤去される前のダムが下流域の砂州動態の経年変化に与える影響，礫上の微細土砂の堆積と流れの三次元性との関係を検討した．

本研究では，荒瀬ダムの部分撤去に伴う，ダム直上流域の河床洗掘，直下流域の土砂堆積，平水時の流れについて検討する．特に，2015年6月の出水で荒瀬ダム直下流に発達した砂州を挟む左岸側の主流路および右岸側の副流路（以下，砂州左岸側流路を主流路，砂州右岸側流路を副流路と呼ぶ）が2016年の出水によってどの様な影響を受けたかについて考察した．

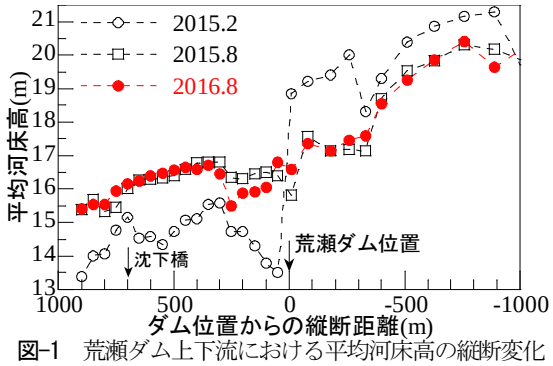
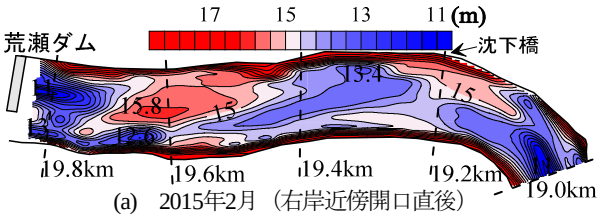
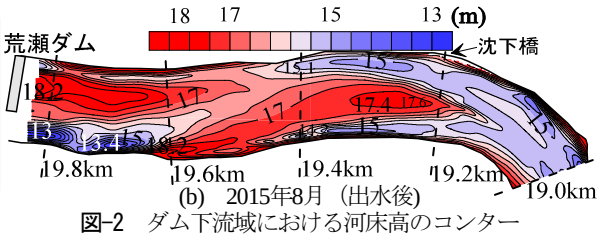


図-1　荒瀬ダム上下流における平均河床高の縦断変化



(a)　2015年2月（右岸近傍開口直後）



(b)　2015年8月（出水後）

図-2　ダム下流域における河床高のコンター

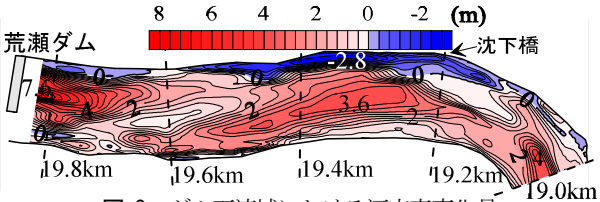


図-3　ダム下流域における河床高変化量
(2015年2月から2015年8月)

なお，欧米ではダム撤去の事例研究は幾つもあるが，段階的な部分撤去法については希少である．

2．荒瀬ダム撤去と河道変化

(1)　荒瀬ダムの撤去方法

荒瀬ダムの撤去方法は段階的部分撤去法として「右岸先行スリット撤去工法」を採用し，6年間かけて撤去され六段階施工で行われている．第一段階（2012年度）ではゲートの撤去に着手し，水位低下設備を設置，第二段階（2013年度）では右岸側管理橋と右岸側門柱を撤去する．当初の手順見直しが行われ，第三段階（2014年度）で右岸側越流部を撤去，第四段階（2015年度）で左岸側管理橋と左岸側門柱を撤去，第五段階（2016年度）で左岸側越流部を撤去，第六段階（2017年度）で右岸側非越流部の撤去により撤去完了となる．

右岸先行スリット撤去工法が採用された理由としては，ダム建設当時の右岸側澪筋の河川流況により早く近づけること，施工が効率的であることなどが挙げられる[2)]．

(2)　平均河床高の変化

a) 河床高の経年変化およびダム上流の洗掘土砂量

荒瀬ダムは第三段階（2014年度）にダム右岸近傍に開口部が設けられた．**図-1**は過去3時期（2015年2月：右岸近傍開口直後，2015年8月：出水後，2016年8月：出水後）における荒瀬ダムの直上流および直下流における平均河床高の縦断変化を示す．熊本県から提供された河床高のデータを整理し平均河床高を図示した．

ダムを挟んだ直上流と直下流の100m区間において平均河床高の高低差は2015年2月では約5.4mであるが，出水後の2015年8月では約1.8mまで減少しており，2015年の出水により河床高の不連続性がかなり解消され，直上流域における急激な洗掘および下流域では急激な堆積が見られる．出水後の2016年8月では，2015年8月と比較すると，平均河床高はダム直下流300mまでの区間では最大で約1m程低下しているが，400m～700mの区間では殆ど変化がない．荒瀬ダムの直下流700mではかつて木杭で造られた沈下橋が建設され，この位置は，堰上げ背水効果の影響で流速の低下および河床上昇が発生していた．さらに荒瀬ダムから沈下橋の区間は，河床勾配が相対的に緩やかで川幅も広く，2015年の出水に伴う急激な上流からの土砂供給を砂州発生として受け止め貯砂池の役割を果たし，下流域への影響を緩和したしたことが認められる．

なお，2015年の出水後に沈下橋の杭は取り除かれ，2016年の出水に対して顕著な貯砂機能は認められない．

b)　2015年の出水による河道変化

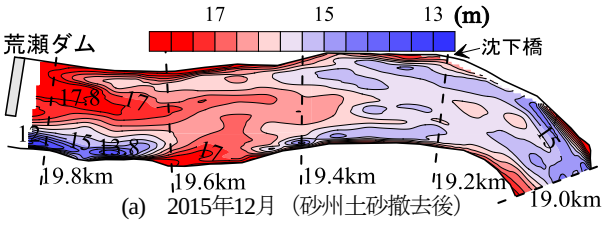
図-2はダム右岸近傍が開口後の2時期（2015年2月：右岸側近傍開口直後，2015年8月：出水後）の河床高のコンターを示す．

図-3は2015年8月の河床高から2015年2月の河床高の差分から得られた河床高変化量を示す．なお，対象区間は，球磨川河口より上流の19.0km ～19.85km であり，荒瀬ダムから下流の50m～900m区間に当たる．

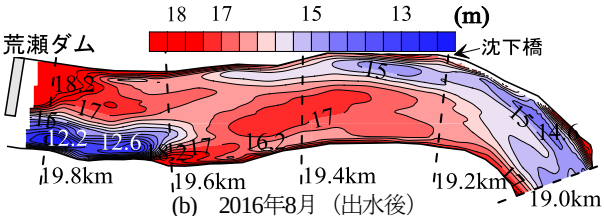
荒瀬ダム開口部の影響が無い2015年2月（**図-2 (a)**）の河道の河床高は，19.6km左岸付近で砂州が現れその最大値15.8mを示すが，その下流域19.2km左岸の砂州を除けば顕著な砂州の発達は認められない．19.2km ～19.6km区間における最深河床は流下方向に19.6kmでは右岸近傍，19.3kmでは左岸近傍に変化する緩やかな蛇行を示しているが，横断方向に顕著な高低差は無く比較的平坦な河床であることが分かる．

2015年の出水時期に年最大の流量程度である2,000m^3/sレベルの出水が6月に3回，8月に1回の計4回生じ，このため開口部を有するダムの直下流では大規模な砂州の出現がみられた[2)]．

2015年8月（**図-2 (b)**）の河道において19.2km～19.6km区間では流下方向に右岸から河道中央部へと伸びる砂州の発達が認められる．澪筋は19.65kmでは右岸近傍であるが，流下に伴って左岸側に向きを変え，19.15km～



(a) 2015年12月（砂州土砂撤去後）



(b) 2016年8月（出水後）

図-4 ダム下流域における河床高のコンター

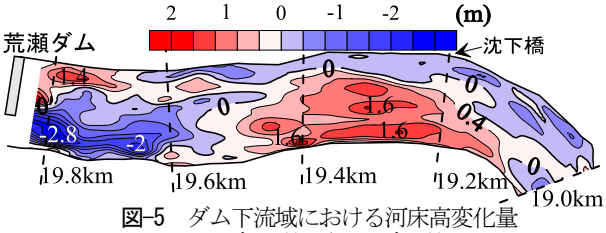


図-5 ダム下流域における河床高変化量
(2015年12月から2016年8月)

19.4km区間では左岸側に沿っていることが分かる．左岸側19.2km～19.8km区間では国土交通省八代河川事務所によりコンクリートブロックによる河岸強化が施され，河道湾曲部の遠心力二次流に加え，粗度の低下に伴う水際部の流速の高速化により洗掘が生じたことが一因と考えられる．

なお，副流路の河床高は19.4kmにおいて極小値14.20mであり主流路左岸澪筋部の15.10mに較べ低いことが認められる．平水時において19.2km～19.45kmの右岸側では砂州尻ワンドの地形[5]となる流路が確認できる．

荒瀬ダム直下流19.55km～19.85km区間の左岸側にも河床高の極大値18.2mを示す砂州の出現が見られる．

2015年2月から2015年8月の間の河床堆積（図-3）），その最大値が19.85km河道中央部において7.6mの河床上昇を示し，ダム背後において顕著な堆積が認められる．砂州の出現が見られた19.2km～19.6km区間では砂州の頂部に当たる19.25km～19.4km区間において3.6mの河床上昇が認められる．河床洗掘は，19.15km～19.6km区間の左岸側で顕著であり，最大洗掘深は2.8mであり，可成り大きいことが分かる．

平水時において19.2km～19.45kmの副流路では砂州尻ワンドの地形となり砂州内の伏流水によって濾過された湧水が発生したことが考えられる．即ち，主流路となった左岸側では河道湾曲部に伴う遠心力二次流により高速域となり右岸に較べ水位が高まり，砂州を挟んだ主流路と副流路の間で横断方向に動水勾配が生じる．更に，砂州の河床材料は巨礫で構成され透水係数が大きいことから，砂州内の伏流水の流速が高まった事が示唆される．

開口部直下流の19.8km右岸付近では出水時に高速流となることが予想されるが顕著な洗掘は認められず，河床は平衡状態を保っていることが分かる．

c) 2016年の出水による河道変化

図-4はダム右岸近傍が開口後の2時期（2015年12月：砂州土砂採取後，2016年8月：出水後）の河床高のコンターを示す．

図-5は2016年8月の河床高から2015年12月の河床高の差分から得られた河床高変化量を示す．

図-4(a)は，ダム撤去工事の施工上の都合などから，19.2km～19.6km区間で砂州の土砂量約2万m^3を掘削し撤去した後の2015年12月における河床高である．この工事により2015年8月（図-2(b)）に見られた明瞭な砂州は消失し，河床は平坦となっている．

2016年の出水期を前に，第四段階（2015年度）における撤去により，左岸側管理橋および左岸側門柱が撤去された．これにより出水時に左岸側堤体を越流する流れの障害が無くなった．2016年8月までの出水では，2,000m^3/sレベルの出水が3回（5，6，7月）生じた．

図-4(b)より，2016年の出水によりダム直下流では再び2015年と類似の大規模な砂州が19.2km～19.6km区間に出現した．砂州の形状は2015年8月とほぼ類似しているものの19.2km～19.6km区間では砂州の高さは回復されておらず，2015年8月の砂州頂部位置では約1m低いことが認められる．

一方，副流路には土砂が堆積し明瞭な砂州尻ワンドの地形となる流路ではなくなっている．

2015年12月から2016年8月の間の河床変化を示す図-5より，土砂の堆積は19.2km～19.5km区間の砂州で最大堆積厚1.6m，副流路で最大堆積厚さは1.6m，ダム背後の左岸で最大積厚さは1.4mである．顕著な洗掘は，荒瀬ダム右岸開口部の直下流において最大洗掘深2.8mを示す．

2015年8月との比較では，砂州は水平面スケールでは同程度であるが砂州頂部の高さは低く，主流路は大きな変化は無く，副流路は19.2km～19.4km区間で最大2mの土砂堆積が生じ，砂州尻ワンドの機能を失っていることが認められた．球磨川下流域の基準点である萩原地先の計画洪水流量は7,000m^3/sであるのに対して，2015年度および2016年度の最大流量は，各々，2,211 m^3/s，および2,782 m^3/sであることから[2]，あまり大きな流量ではなかったことが分かる．

3．荒瀬ダム直下流域における現地観測法

(1) 調査場所，計測装置およびその方法

図-6は2016年8月11日に熊本県企業局により撮影された荒瀬ダム直下流の航空写真であり，図中には流れの計測線を示す．球磨川河口から19.2km～19.45km(荒瀬ダムから下流500m～700m)区間において，流れの計測および河床材料調査を行った．本研究では，出水の影響が少な

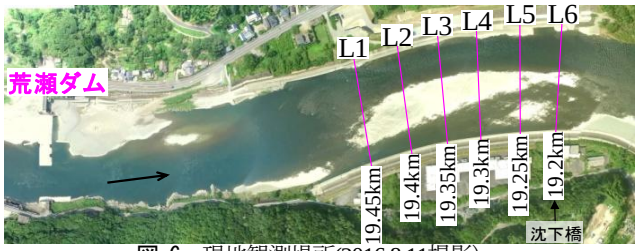


図-6　現地観測場所(2016.8.11撮影)

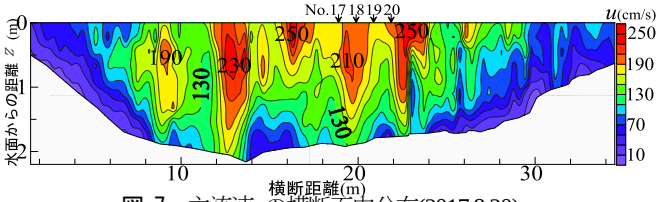


図-7　主流速uの横断面内分布(2017.8.20)

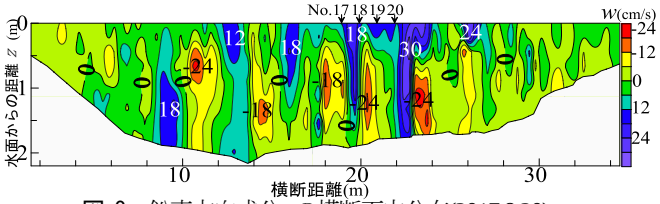


図-8　鉛直方向成分wの横断面内分布(2017.8.20)

い無い2015年10-11月，2016年11月および2017年6，8月の晴天日を選んだ．また，調査場所の選定はダムの部分撤去後に大規模な砂州が形成され，河川環境への影響が大きいことに加え，流れに関してはダム撤去前から同一場所での計測データがあり，経年変化を検討することが可能であるためである．

主流路における流れの計測では，**図-6**の計測線においてRiver BoatとWorkhorse ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) センチネル1200kHzを用いた．

副流路における流れの計測は，2015年においてはADCPを用いて実施され，2017年においては水深が小さくADCPを用いることが出来なかった．そのため，表面流速の計測では副流路上流にトレーサとして長さ2cmの緩衝材を投入し，UAV(Unmanned Aerial Vehicle)により上空44mより静止状態で動画を撮影し，PTV(Particle Tracking Velocimetry)法を適用した．なお，表面流速の精度検証としてプロペラ流速計も併せて用いた．

(2)　砂州上における河床粒径の測定

2015年および2016年の出水後に，荒瀬ダム直下流19.1km～19.5km間に発生した大規模砂州の表層河床材料を対象に写真撮影した．2015年では砂州を横断方向に左岸側，中央，右岸側の3箇所，縦断方向には19.25km～19.45kmの間を50m間隔で5箇所の総計15箇所で実施した．

2016年では，砂州を横断方向に左岸側，中央，右岸側の3箇所，縦断方向には19.15km～19.45km間の約300mに対して30m間隔に設定した．計測箇所は砂州中心軸で10箇所，左岸側および右岸側はそれぞれ8箇所で総計26箇所である．河床材料の代表径は面格子法に基づき，各地点ごとに粒度曲線より算定した．

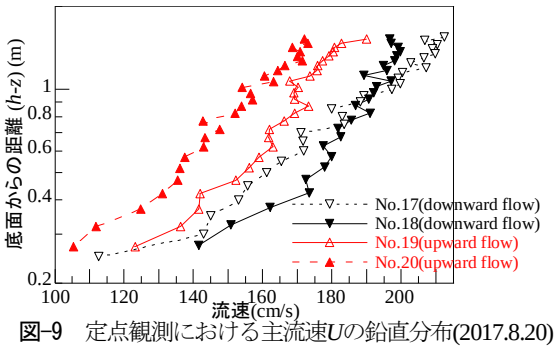


図-9　定点観測における主流速Uの鉛直分布(2017.8.20)

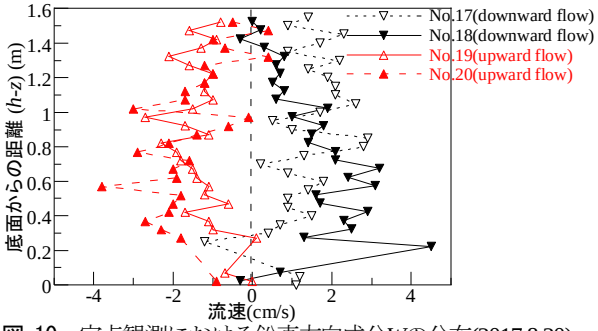


図-10　定点観測における鉛直方向成分Wの分布(2017.8.20)

4．観測結果

(1)　主流路における流速の横断面内分布

River BoatとWorkhorse ADCP(1200kHz)を用いた流れの計測は，2015年10月27日，2016年11月15日および2017年8月20日に実施された．紙数の制約で本論では2017年8月20日の計測結果を示す．

図-7および**図-8**は，荒瀬ダムから650m下流の19.25km地点すなわち**図-6**中の計測線L5における主流速uおよび鉛直方向成分wの横断分布をカラーコンターで示す．ここに，uおよびwは，超音波ピンギング発信周波数は25Hzとし，20個のデータをアンサンブル平均された値である．横軸は，左岸からの距離を示す．なお，計測時の荒瀬ダム地点での流量は約83m^3/sであった．

主流速uは，水際部を除けば高速域と低速域が横断方向に交互に規則的に現れ，水面近傍における高速域では250cm/s，低速域では130cm/sであり有意な差であることが分かる．流速の等値線は高速域では水面付近から楔上に下に凸，低速域では河床付近から上に凸の形状であることが分かる．高速域の発生箇所は左岸から9m,13m,17m,20m,23mの5箇所，発生間距離は4m,4m,3m,3mであり平均3.5m，平均水深が約1.8mであることから，水深スケールの2次流セルの発生が示唆される．

鉛直方向の流速成分wは，上昇流および下降流が横断方向に交互に現れ，主流速uの約10%強である．主流速は，鉛直方向の流速成分との相関が高く，下降流部で高速域，上昇流部で低速域となっていることが明瞭に認められる．

図-9および**10**は，主流速の時間平均値Uおよび二次流の鉛直成分Wの鉛直分布である．時間平均値UおよびW

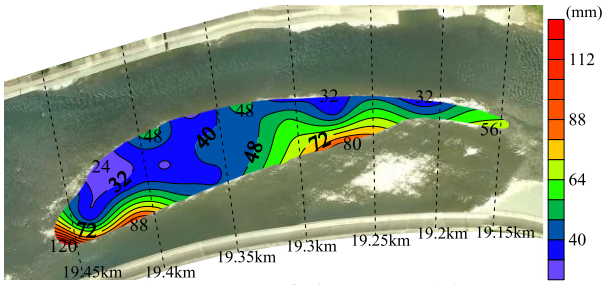


図-11　砂州上における河床礫のD_{50}平面分布(2016.11.13)

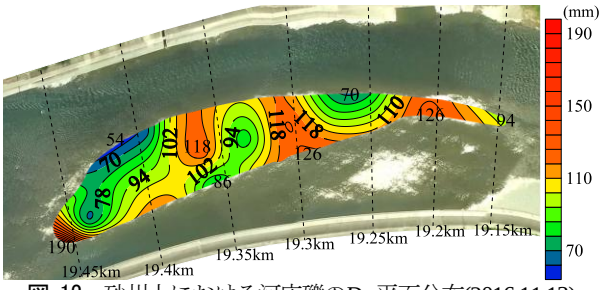


図-12　砂州上における河床礫のD_{90}平面分布(2016.11.13)

は，上昇流および下降流が発生した箇所でADCPの位置を1分間定点観測した流速データの時間平均値である．

主流速の時間平均値Uは，上昇流域に較べて下降流域で大きな値を示し，その差は鉛直方向に大きな変化は無い．

二次流の鉛直成分Wは，水面付近および河床付近で小さくなる傾向を示し，相対的に半水深付近で大きい様である．アンサンブル平均値に較べ可成り小さくなっており，ADCPの揺動も影響していることが考えられる．

主流路においては2015年および2016年において19.25km～19.45km間で同様の結果を示したことから，並列らせん流の出現性は高いことが認められた．

なお，水面幅・水深比は15～20の範囲にあり，水際部において顕著な二次流が無いことから河道中央部に見られる二次流は測岸が主因とは考え難い．この結果は，Blanckaertらの室内実験結果[6]や鈴木ら数値計算結果[7]と類似の傾向を持つ．著者等の知る範囲では表面流況を除き実河川における並列らせん流の実測事例は比較的少ない．

なお，雨水の影響が小さく2011年11月9日に約65m^3/sの流量において荒瀬ダムから650m下流の同一地点でADCPを用いて流れを計測した．主流速uはy=0～20mの範囲で20cm/s以下，y=20～50mの範囲で30～60cm/sを示しy=60m～80mの範囲で約20cm/s以下であり，全般的に小さい．一方，鉛直流速成分wは最大で約4cm/s程度の上昇流および下降流が発生しているが，明瞭な二次流セル群は見られなかった[4]．2017年の主流路は砂州発生による河道断面の縮小により2011年に較べて，平水時において水面幅は約1/2倍，水深は約2/3倍となった．その結果，主流速は可成り大きくなり，並列らせん流の発生による流れの三次元性が顕著に現れた．

(2)　砂州河床材料の水平分級

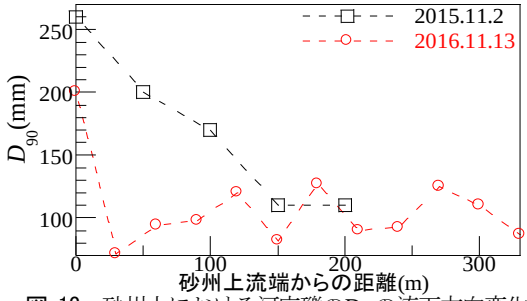


図-13　砂州上における河床礫のD_{90}の流下方向変化

図-11および12は調査日が2016年11月13日における砂州表層の河床材料の中央粒径D_{50}および累加百分率が90%であるD_{90}の平面分布である．

中央粒径D_{50}は右岸側では流下距離0m～80m，170m～230mの間において64 mm～104mmの範囲で大礫(cobbles)，左岸側では24mm～48mmの範囲で中礫(coarse gravel)であり，相対的に左岸に較べて右岸側で大きいことが分かる．上流端付近を除く砂州中央部では粒径が32mm~48mmであり，砂州左岸側では粒径が24mm～48mmであり比較的小さい．

粗粒化した河床の変動や流れの抵抗に影響するのは比較的大きい粒径集団であることから，D_{90}を代表粒径とした．D_{90}は砂州上流端近傍で最大値190mm，左岸側で流下距離70m近傍で最小値30mmを示す．全般的にD_{90}は左岸側に較べ右岸側で大きくなる傾向を持ち，流下方向に比較的大きい粒径集団と小さい集団が交互に縞状に分布していることが分かる．

図-13は砂州中央におけるD_{90}の流下方向変化である．2015年11月2日に調査された河床材料の結果も示す．

図より2016年ではD_{90}は，砂州先端部の200mmを除けば71mm～125mmの範囲で変化するものの系統的変化は見られないない．

一方，2015年ではD_{90}は，110mm～260mmの範囲で流下方向に一様に減少し，水平分級が発生していることが分かる．また，D_{90}は，砂州上流に当たる0m～100mの間では2015年に較べ2016年の方が明瞭に小さく，その下流100m～200mの間では変化が余りない．2015年に較べ2016年では砂州上流において河床材料が細粒化した原因としては，図-1よりダム近傍における河床勾配が2016年では相対的に緩やかとなり，2015年出水後の左岸側管理橋と左岸側門柱の撤去に伴い2015年には右岸側に流れが集中していたのが緩和されたため河床洗掘の位置がダムから1km以上離れた上流域に移り[2]，掃流砂の粒度も小さくなったことが予想される．

(3)　副流路における流れ場

計測は2015年10月28日，2017年6月3日に実施され，荒瀬ダム地点の流量はそれぞれ約40m^3/s，約39m^3/sであった．図-14は，副流路における流量の流下方向変化を示す．2017年の流量算定には，流速の鉛直分布に1/7乗則を適用した．

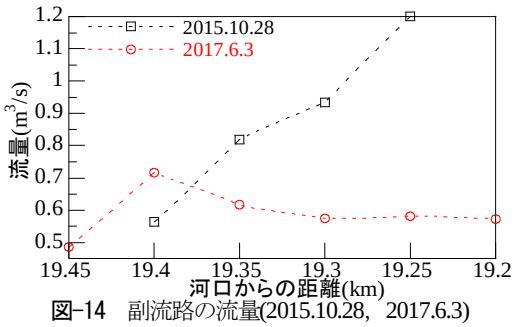


図-14　副流路の流量(2015.10.28，2017.6.3)

副流路における流量は，2017年では19.45km～19.5km地点区間で上流から河川水の流入が有り，湧水ではない．このため，19.4km～19.45km区間では湧水はあるものの19.4kmより下流では湧水は見られない．2015年では上流からの河川水の流入は無く，流量は全て湧水量でその大きさは，一様に増加傾向を示している．

図-15は，主流路および副流路における澪筋部の河床の流下方向変化を示す．副流路は，19.45kmを境にその上流では顕著な変化は無く，下流では最大で2m程度の堆積が見られる．一方，主流路においては，19.45kmを境にその上流では洗掘，下流では顕著な変化は無い．さらに，2016年では主流路の澪筋部に較べ副流路の澪筋部の河床高は19.2km～19.4km区間で高く，最大で2mにまで達している．2015年では，逆に副流路の澪筋部の河床高は主流路のそれに較べて低く，その最大値は1mに及んでいる．主流路と副流路の水面差から得られた動水勾配も2015年に較べて2016年では大きく異なり，19.35km地点ではゼロに近い値であった．

2016年の出水による河道変化の節でも述べた通り，副流路は土砂の堆積により河床上昇を起こし砂州尻ワンドの地形は消失した．

５．おわりに

本研究では，荒瀬ダムの段階的部分撤去に伴う，河床変動，砂州動態，砂州を挟む主流路および副流路の平水時の流れについて考察した．

荒瀬ダム上下流における平均河床高の縦断変化から，荒瀬ダムの直下流700mではかつて木杭で造られた沈下橋が建設され，この位置は，堰上げ背水効果の影響で流速の低下および河床上昇を発生させた．さらに荒瀬ダムから沈下橋の区間は，河床勾配が相対的に緩やかで川幅も広く，2015年の出水に伴う急激な上流からの土砂供給を大規模な砂州発生として受け止め貯砂池の役割を果たしたことを明らかにした．

荒瀬ダムの段階的部分撤去に伴い，ダム直下流ではダム撤去前には河床がアーマ化され一様な流れの河道がダム撤去後には河道中央に砂州が形成され多様な河床形状，河床材料および流れが形成され，生物の生息環境として良好な条件になったことが示された．

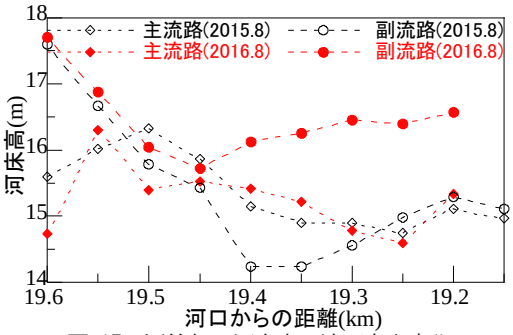


図-15　澪筋部の河床高の流下方向変化

特に，2015年6月の出水で荒瀬ダム直下流に発達した砂州を挟む左岸側の主流路では極めて安定した並列らせん流の発生を捉え，更に右岸側の副流路では2016年の出水によって砂州尻ワンドの地形が消失した．更に，2017年2月時点において荒瀬ダムから上流約3km区間で推定堆砂量が約12万m^3と試算されていることから[2]，数年は荒瀬ダム上流の河床洗掘および下流では土砂堆積による河床上昇が予想される．砂州尻ワンドの地形は生物の生息環境として重要な機能を有することから，河道が安定した段階で再度検討する必要があると考える．

謝辞：現地調査を実施するにあたり，九州地方計画協会の支援を受けた．また国土交通省九州地方整備局八代河川国道事務所および熊本県企業局には数多くの資料を提供いただいた．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 竹村広太郎：日本の近代化における河川行政の変遷－特にダム建設と環境対策，日本水産学会誌，Vol.73，No.1，pp.103-107，2007.
2) 荒瀬ダム撤去HP：http://www.arasedamtekkyo.hinokuni-net.jp/(閲覧日：2017年9月26日).
3) 小林草平，角哲也，竹門康弘：ダム撤去後に下流に形成した砂州の生物生息場機能，河川技術論文集，第22巻，pp.463-468，2016.
4) 大本照憲，平川隆一：荒瀬ダム下流域の土砂輸送および流れに関する研究，土木学会論文集B1(水工学)Vol.，No.4，I1057-I1062，2013.
5) 竹門康弘，土と基礎の生態学6.砂州の生息場機能講座，土と基礎，55，pp.37-45，2007.
6) K.Blanckaert, A.Duarte, A.J. Schleiss: Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels, Advances in Water Resources, pp. 1062–1074, 2010.
7) 鈴木理沙，木村一郎，清水康行：幅広断面開水路における第二種二次流の数値シミュレーション，土木学会論文集B1(水工学)Vol.71，No.4，I_595-I_600，2015.

(2018. 4. 3受付)