土木学会論文集B1(水工学) Vol.70, No.4, I_1069-I_1074, 2014.

佐波川における堰の統廃合後の河床変動についての検討

A STUDY ON RIVER BED VARIATION AFTER THE CONSOLIDATION OF THE WEIR IN SABA RIVER

高村紀彰[1]・赤松良久[2]・永野博之[3]
Yoshiaki TAKAMURA, Yoshihisa AKAMATSU, Hiroyuki NAGANO

[1]学生会員　学(工)　山口大学大学院　理工学研究科社会建設工学専攻
（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）
[2]正会員　博(工)　山口大学大学院准教授　理工学研究科社会建設工学専攻
（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）
[3]正会員　博(工)　（株）八千代エンジニヤリング　名古屋支店
（〒460-0003　愛知県名古屋市中区錦3-10-33）

The Saba River in Yamaguchi Prefecture has many weirs and it induces a flood control problem due to breaking the continuity of water and sediment. The removal and integration of weirs have been executed in the Saba River. It is important to know the influence of the weir removal on the river bed deformation in the downstream area.

The purpose of this study is to estimate the sediment movement and river bed deformation due to the removal and integration of weir using two-dimensional numerical simulation. The results of numerical simulation indicate that two-dimensional simulation considering the effects of vegetation to the water flow is useful and the river bed deformation is to be complicated with progress of the time.

Key Words : *removal of weir, river bed variation, numerical simulation, Saba river*

１．はじめに

堰は灌漑，上水または発電用水等の取水や流量調節などを目的として河川内に設けられる横断構造物であり，わが国では昔から簡単な構造の堰を水田への取水用に多数建設してきた[1)]．一方で，堰等の構造物の設置が，堤防の弱点となるおそれがあることや，操作および維持管理の観点から，その数は極力少なくするのが望ましいとされ，可能な限り統合に努めることが勧められている[2)]．

河道計画の観点からみれば，堰は水を堰上げるのみならず，上流から下流へ流送される土砂の連続性を遮断するため，堰上下流の河道形状はもとより生物生息環境にも大きな影響を及ぼす．このため，堰の設置・除去による人為的インパクトの影響を水理学的に検討することは重要である．堰まわりの河床変動に関する既往研究として，福岡ら[3)]は固定堰の可動堰化に伴う河床への影響について河床モニタリングと二次元河床変動計算を通じて検討を行っている．朝位ら[4), 5)]は，堰統廃合計画が進められている河川を対象に準二次元不等流計算による河床変動計算を行い，固定堰の撤去が河床に及ぼす影響と長期間の河床変動特性について検討している．しかしながら，福岡らの研究は単独の堰周辺を対象としたものであり，朝位らの研究は堰が複数連続した河川を対象とするものの，一次元的な手法に基づいており，長期的な河床変動については検討可能であるが，河床の横断形状につ

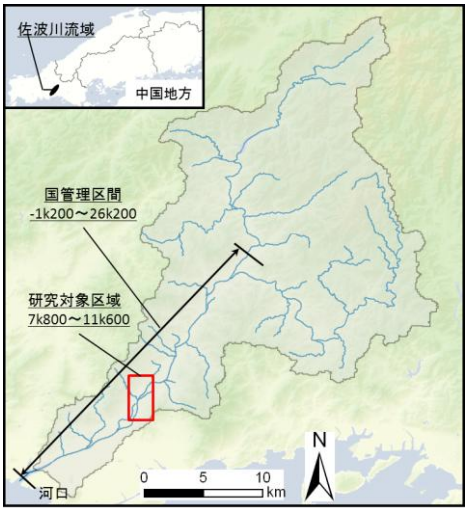


図-1　佐波川流域図

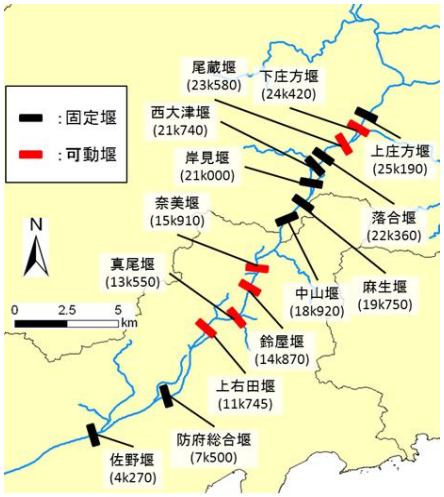


図-2　佐波川堰位置図

いての議論がなされないため，大規模出水による湾曲部などの局所的な河床変動については検討が困難である．

本研究は，堰が連続して設置される河道における堰撤去が下流に及ぼす影響について土砂水理学的な知見を得ることを目的とし、その第一歩として，堰統廃合計画が進められている一級河川佐波川を対象に，二次元河床変動を用いて堰上下流の流れ場と長期的な河床変動特性について検討を行うものである．

2．佐波川の堰統廃合

(1) 佐波川の概要

佐波川は山口県のほぼ中央に位置し，その源を山口県と島根県境の三ツヶ峰に発し，山間峡谷部から野谷川，三谷川，島地川等の支流を合わせ，防府市の市街地北部を流れ，周防灘に注ぐ幹川流路延長56km，流域面積460km^{2}の一級河川である（図-1）．流域の土地利用は山地が約90%を占め，農耕地は谷底平野と下流部の三角州および干拓地に開けている．

佐波川本流の直轄区間（-1k200～26k200）内には現在14基の堰が存在しており（図-2），27.4kmという直轄区間に多くの堰が存在していることが特徴の一つである．佐波川では，堤防の高さや幅が不足している箇所が存在し，土砂堆積による砂州の発達や固定堰等による堰上げにより流下能力の不足している箇所が存在するため，固定堰の統廃合や可動堰化することにより，治水能力の向上を果たすといった河川整備が行われている．

(2) 佐波川の堰統廃合

佐波川の堰統廃合が行われた本研究対象箇所を図-3に示す．河口から11k883に設置されていた旧峪堰，10k483に設置されていた旧金波堰は共に固定堰であり，流下能力の低い箇所であった．このような状況を受け，旧峪堰直下流に可動する上右田堰を建設し，既設の旧峪堰，旧

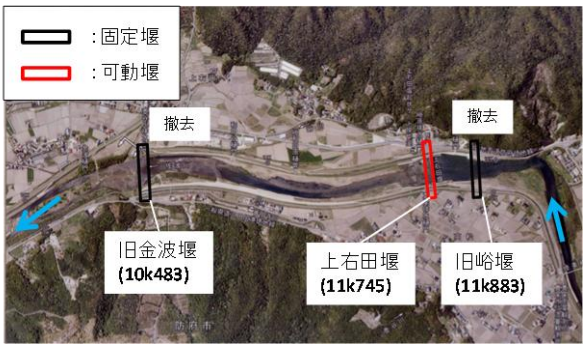


図-3　佐波川堰統廃合箇所

金波堰を撤去・統合することで河積の拡大を図り，流下能力の増加を目的とする事業を行った．2006年6月に上右田堰は完成し，2008年3月に旧峪堰，旧金波堰の撤去工事は完了した．2009年7月21日に発生した洪水後，上右田堰の上下流で大量の土砂堆積が生じ，今後の土砂堆積の進行次第では可動堰のゲート機能に支障をきたすことが懸念された．また，可動堰の上下流に位置していた2つの固定堰跡地の上流側では洗掘が，下流側では堆積が進行していることが確認された[5]．この懸念に対し，朝位ら[4, 5]は河床材料調査に基づくデータ解析や，一次元河床変動計算による長期的な河床変動特性について検討を行い，堰撤去後の河道が安定に至るまでに要する期間について検討を行った．その上で，樹木が繁茂した領域のように河床が一様に変動していない地点における実現象と計算結果との乖離について指摘している．本研究では，二次元河床変動計算を用い，横断形状や植生の分布状況を考慮に含め，堰の撤去による河床変動への影響について検討する．

3．解析方法

(1) 河床変動シミュレーションの概要

本研究では，河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアである，iRIC(International River Interface Cooperative)ソフトウェアを用いて数値シミュレーションを行った．iRICは河道内の植生作用を考慮した水位，流速，河床変動の数値シミュレーションが可能である．計算に用いたソルバーについては，流れ場の再現，河床変動計算共に一般座標系を用いて河川の非定常平面二次元流れの計算を行うことが可能なNays2Dを用いた．

(2) 水の流れ場の再現性の検討

河床変動に先立ち，粗度係数の同定およびモデルの検証のために，水の流れ場の再現性について検討した．

a) 計算条件

計算に用いた断面データは，2009年2月に行われた測量結果（2008年度）を元に作成したメッシュデータを用いた（図-4）．計算区間は，堰の統廃合が行われた旧金

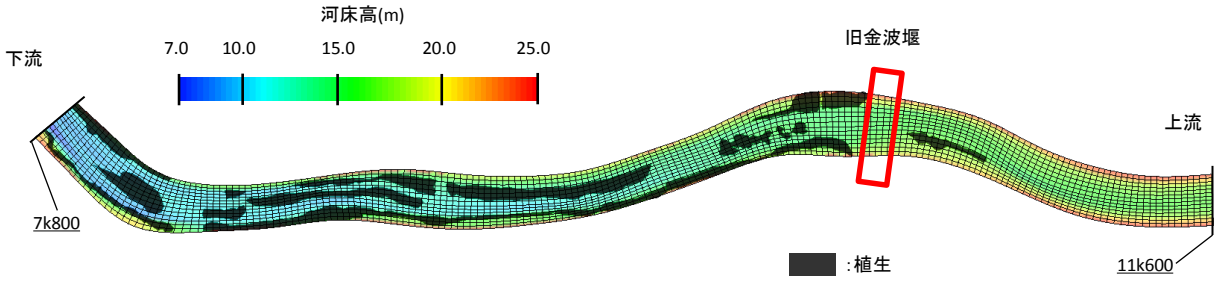


図-4　計算格子

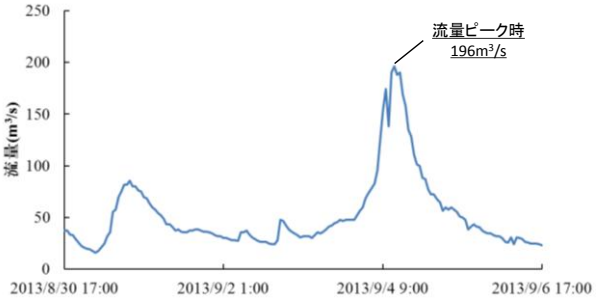


図-5　2013/8/30～9/6流量

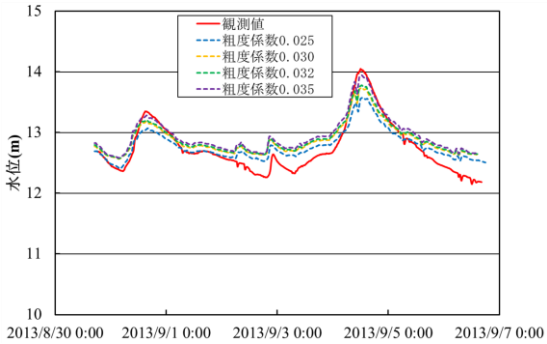


図-6　9k200地点における観測値とマニングの粗度係数別計算水位の比較

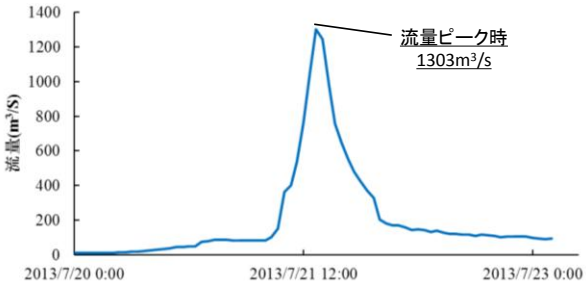


図-7　2009/7/20～7/23流量

波堰撤去区間の上流端にあたる上右田堰直下（11k600地点）を計算区間の上流端とし，防府総合堰直上（7k800地点）を下流端とした．植生の抵抗については，植生の抗力係数と単位体積あたりに占める植生の遮断面積を用いて与え，それぞれ1.0，0.5とした．

粗度係数の同定およびモデルの検証は，著者らが設置した水位計による計測値を用いることとし，水位計を設置した2013年8月30日17時00分～9月6日17時00分を計算対象期間とした．境界条件として，上流端には計算対象期間中の真尾観測所の流量を与え，下流端は等流水深とした．対象期間の流量を図-5に示す．

b）流れ場の再現性の検討

Nays2Dを用いて，上流端から同一の流量を流しマニングの粗度係数の値を変化させた時の9k200地点の水位の変化と観測によって得られた水位を図-6に示す．ここで観測値は，圧力式水位計(HOBO U20)を設置した2013年8月30日17時00分～9月6日17時00分において得られた値を示している．流れ場の計算による水位の値はマニングの粗度係数が増加すると大きくなることが分かる．9月4日13時00分における流量のピーク時に観測値の水位は約14mであり，マニングの粗度係数の値が0.035のとき流れ場の計算において再現性が最も高くなっている．このことから，河床変動計算に用いるマニングの粗度係数の値は0.035を用いて進めていくこととする．

4．河床変動計算結果及び考察

佐波川で堰統廃合が行われた，旧金波堰撤去区間の水の流れ場と河床変動特性について，iRICを用いて河床変動シミュレーションによる解析を行った．河床変動計算に関しては均一砂の流砂量式を用いて計算を行った．掃流砂は二次元流れの場の流線方向とこれに直行する方向成分が計算され，流線方向は芦田・道上の式，流線と直行する方向には長谷川の式を使用している．浮遊砂の浮上量は板倉・岸の式，浮遊砂の沈降量はRubeyの式を使用している．また，二次流の強度は水深平均流の流線の曲率を考慮したものから算出している．河床の粒径は，平成9年に行われた現地調査より得られた11k000地点の平均粒径である26.0mmを用い，植生の影響については流れ場の再現性の検討と同値を与えた．また，境界条件としては，上流端に観測された流量を与え，下流端は等流条件とした．掃流砂量に関しては，上流端では平衡流砂量を与え．下流端では掃流砂量の流下方向勾配をゼロとした．浮遊砂に関しては上流端濃度を浮上粒子量と沈降速度から求め，下流端では流下方向勾配をゼロとした．

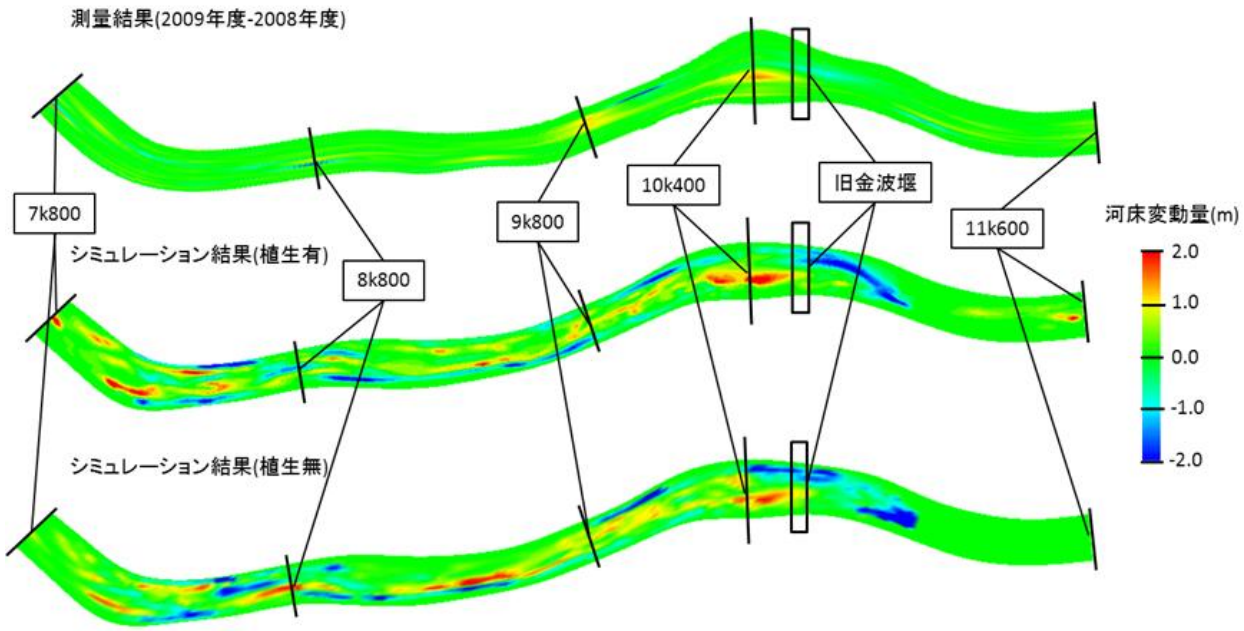


図-8　出水後の河床変動量の測量結果と計算結果の比較

(1) 堰統廃合後の2009年7月の出水による河床変動の再現性の検討

堰統廃合後に起きた2009年7月の出水が河床縦断形状に与える影響を検討するために出水時の流量を与え，出水時における河床変動について解析を行った．与えた流量は，2009年7月20日0時00分～7月23日3時00分である．計算対象とした流量を図-7に示す．

計算結果として，2009年7月の出水前（2008年度）と出水直後（2009年度）の測量結果から得られた河床変動量コンターと，河床変動シミュレーションから得られた河床変動量コンター（植生有と無の場合）を図-8に示す．測量結果から得られた河床変動量について見ると，撤去された旧金波堰の直上で洗掘が起こり，直下では堆積傾向にあるということがわかる．シミュレーションの結果からも上流部，下流部で過大ではあるものの，同様の傾向が見られることがわかる．一方，植生の分布を反映させない場合は，本来植生が存在し固定化された場所である旧金波堰直下の右岸側などで横断方向に見た侵食・堆積箇所が測量結果および植生を考慮した場合と逆になるといった地点が存在し，再現性では植生を考慮した場合に劣るようである．また，侵食・堆積箇所は植生を考慮した場合と比較して狭い範囲にとどまる傾向にある．

さらに，旧金波堰直下である10k400と下流の9k800および8k800地点の断面での河床形状の横断分布について検討する．両断面について洪水前後の測量結果とシミュレーションの結果の比較をそれぞれ図-9～図-11に示す．図-9の断面について，出水前後の測量断面の比較から，河道中央部で大きく堆積する傾向にあることがわかる．シミュレーション結果において，植生を考慮した場合は，河道中央部よりやや左岸よりから右岸側にかけて堆積傾

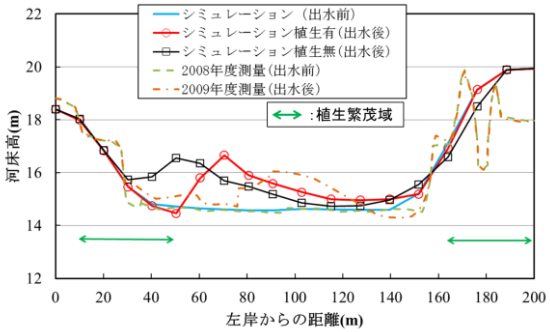


図-9　10k400地点の横断面形状の測量結果と計算結果の比較

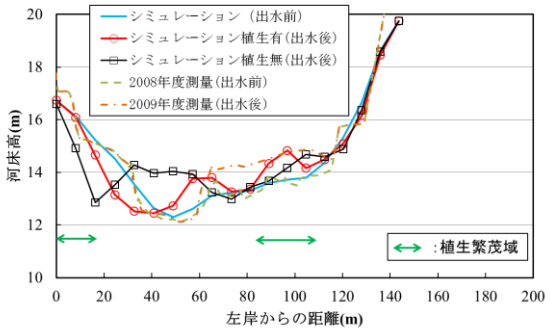


図-10　9k800地点の横断面形状の測量結果と計算結果の比較

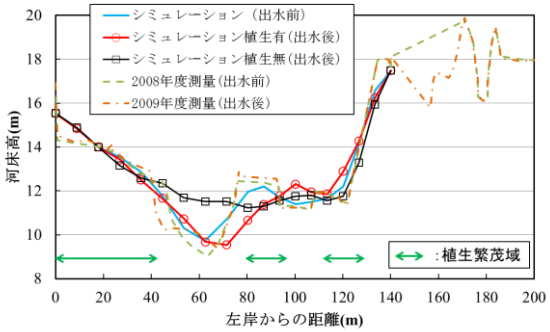


図-11　8k800地点の横断面形状の測量結果と計算結果の比較

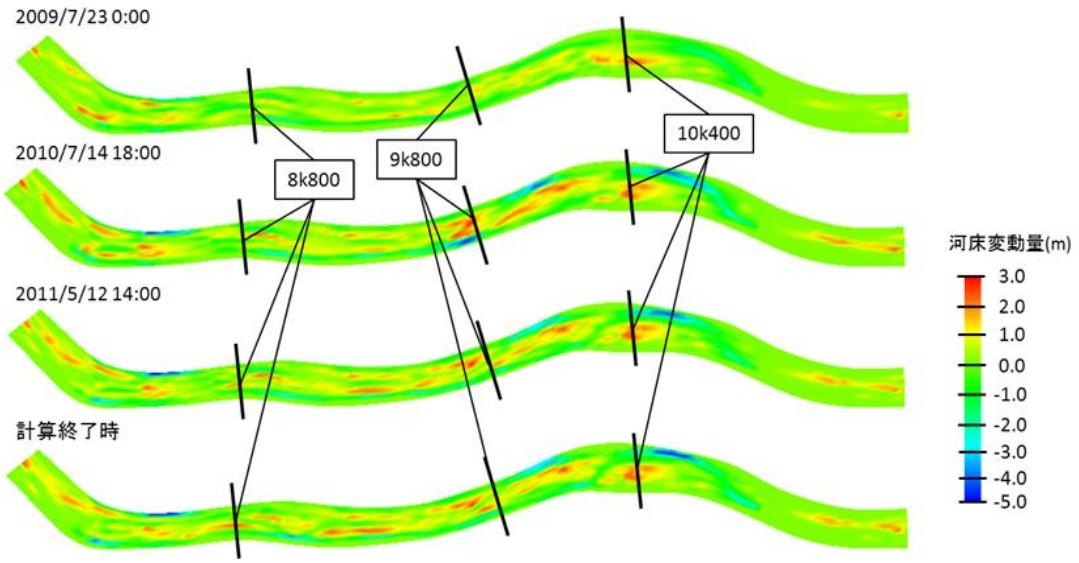


図-13　初期地形からの出水による累積河床変動量

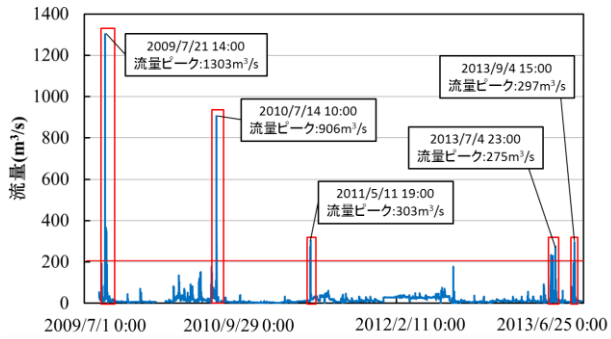


図-12　2009年7月～2013年9月の流量

向にあり，測量断面に傾向は一致する．一方，植生を考慮しない場合は，堆積傾向にあるものの，その位置は左岸寄りであり，植生を考慮した場合よりも再現性に劣る．**図-10**について，出水前後の測量断面の比較から，出水前に左岸から50m程度の地点に位置する澪筋は出水後も維持され，澪筋より右岸側では侵食傾向にあることがわかる．シミュレーション結果において，植生を考慮した場合は，測量断面と同様に澪筋は維持される傾向にあり，堆積傾向は概ね一致している．一方，植生を考慮しない場合は，澪筋が埋め戻され，左岸側に新たな澪筋が形成され，植生を考慮した場合よりも再現性に劣る．**図-9**および**図-10**の区間は，旧金波堰の下流である．水路中央部に着目すれば，堰撤去前に堆積していた土砂が堰の下流側へ移動する傾向は，植生の有無にかかわらず表現されている．**図-11**について，出水前後の測量断面の比較から，この断面は出水の前後で大きな河床変動を生じていないことがわかる．シミュレーション結果において，植生を考慮した場合は，やや澪筋が拡大するものの，測量断面と同様にほぼ河床変動せず，堆積傾向は概ね一致している．一方，植生を考慮しない場合は，澪筋が埋め戻され，河床はほぼ水平な形状に近づき，植生を考慮した場合よりも再現性に劣る．

これらのことから，二次元河床変動計算を用いた本計算において，植生の影響を考慮した場合は，植生を考慮しない場合に比べて，実際の河床変動の再現性は高い．堰統廃合後の出水による河床変動特性は，二次元河床変動計算を用いて土砂の移動の傾向をある程度評価することができると考えられるものの，植生を考慮しない場合は横断方向の侵食・堆積状況が実現象と乖離する傾向にあり，適切な評価のためには植生の影響を考慮することが必要不可欠であると考えられる．

(2) 長期間の河床変動についての検討

堰の撤去による下流河道への影響を検討するため，複数年間の河床変動の特性について検討を行った．与えた流量は2009年7月～2013年9月の流量のうち，ピーク流量が200m^3/sを超えるものを対象として複数の出水を与えた．対象流量の閾値200m^3/sは，代表粒径25.964mmにおいて，計算区間上流端での等流計算より算出した無次元掃流力と無次元限界掃流力（=0.05）を比較して決定した．計算対象とした2009年7月～2013年9月における流量を**図-12**に示す．

図-13は，出水による累積の河床変動量の計算結果を示したものである．３回目の流量ピーク終了までは，縦断方向に筋状に発生する侵食・堆積箇所が時間の経過につれて細かく分離していくことがわかる．３回目のピークから計算終了時までは，河床変動が小さく，河道が安定していることがわかる．また，**図-14～16**は，前項(1)と同様に10k400と下流の9k800および8k800地点の断面での河床形状の横断分布を示したものである．**図-14**の断面について，計算開始時にはほぼ一様な河床高であった断面は，時間の経過につれて水路中央部が堆積し，右岸側が侵食していく．河床形状の変化を見るに，2011/5/12

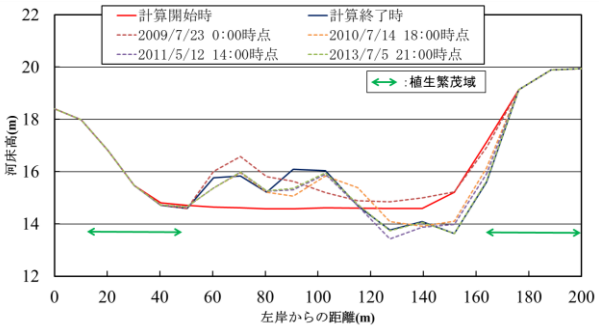


図-14　10k400地点の各出水による横断面形状変化

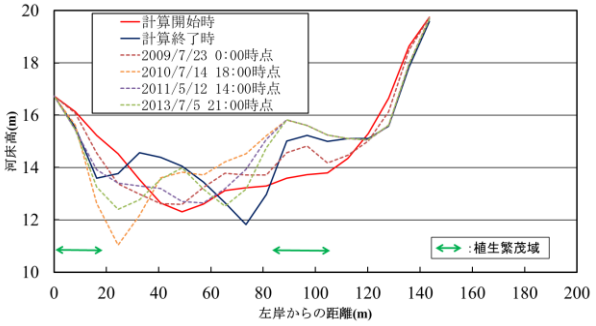


図-15　9k800地点の各出水による横断面形状変化

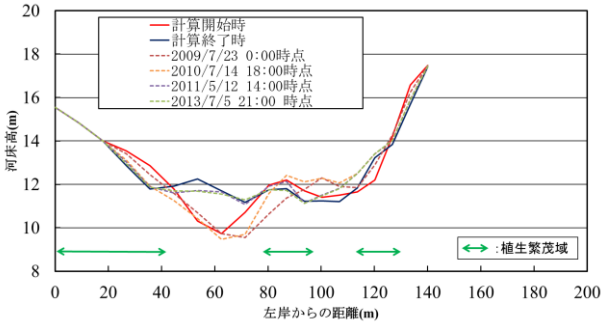


図-16　8k800地点の各出水による横断面形状変化

の14：00時点には計算終了時の河床形状が概ね形成されており，その後の出水では大きな変化は生じていない．**図-15**の断面について，時間の経過につれて左岸側では侵食が進み，右岸側では堆積が進行する様子がわかる．この傾向は2010/7/14 18：00時点まで続き，同時刻において左岸側の侵食と右岸側から水路中央部までの堆積がピークとなる．しかしながら，その後は左岸側の侵食箇所は埋め戻され，水路中央から右岸側にかけて侵食が発生する．最終的には水路中央部が最も侵食が著しい箇所となり，植生のない範囲で時系列的に複雑な河床変動となる．**図-16**の断面は，計算開始時では左岸より60mおよび100m地点の2箇所で澪筋の形状を呈している．上記の2箇所では時間の経過にともない，侵食と堆積を繰り返す．左岸より60m地点では侵食と堆積を繰り返しながらも堆積側に進行し，計算終了時には左岸より100m地点との間に約1.5mあった最深部の高低差はほぼ同程度となった．最深部の位置は時間の経過につれて水路中央部へと移動した．一方，左岸より100m地点での澪筋形状は，時間の経過につれてほぼ均等に河床の昇降を繰り返し，横断方向には遷移しない．共に，河床変動は植生のない範囲に目立ち，澪筋の固定には植生の存在が大きく影響することがわかる．

５．おわりに

本研究では，堰が連続して設置される河道における堰撤去が下流に及ぼす影響について二次元河床変動を用いて堰上下流の流れ場と長期的な河床変動特性について検討を行った．その結果，以下の結論を得た．

(1)堰の撤去による河床変動を評価するには，二次元河床変動計算が有効である．植生を考慮した場合と考慮しない場合の2ケースの計算を実施し，測量結果と比較したところ，植生を考慮した場合は，横断方向に見て侵食・堆積傾向は測量結果と概ね一致する一方で，植生を考慮しない場合は侵食と堆積箇所が測量結果と逆になる結果となった．このことから，検討に際し，植生の影響を適切に評価することが必要である．

(2)堰の撤去後について長期の河床変動計算による検討を行った．その結果，計算初期に縦断方向に筋状に発生する侵食・堆積箇所が，時間の経過とともに枝分かれすることがわかった．また，河床変動は植生のない範囲に目立ち，澪筋の固定には植生の存在が大きく影響することがわかった．

謝辞：本研究は国土交通省受託研究「佐波川の河床掘削・堰撤去が河川環境に与える影響の研究」の一環として行った．本研究に際して，国土交通省山口河川国道事務所から水文データ，測量成果，航空写真等の貴重なデータの提供を頂いた．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 高橋裕：河川工学，東京大学出版会，pp.236-237，1990.
2) 国土交通省河川局監修，日本河川協会　編：国土交通省河川砂防技術基準　同解説・計画編，山海堂，pp.142-143，2005.
3 福岡捷二，海野修司，成田一郎，辰野剛志，西本直史：多摩川二ヶ領宿河原堰の改築による堆積土砂の移動，水工学論文集，第48巻，pp.1081-1086，2004.
4) 朝位孝二・高崎敦彦・萬運・今津勉：平成21年7月洪水における佐波川の水収支と土砂収支について，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.4，pp. I_1045- I_1050，2012.
5) 朝位孝二・高崎敦彦・村岡和満・萬運：平成21年7月洪水における佐波川の河床材料の変化および長期間河床変動について，土木学会論文集B1（水工学），Vol.69，No.4，pp. I_997-I_1002，2013.

(2013. 9. 30受付)