

吉野川岩津狭窄部における サブボトムプロファイラーを用いた堆積砂層厚 の面的把握と洪水時の流況・河床変動特性

ESTIMATION OF SEDIMENTARY LAYER THICKNESS USING SUB BOTTOM
PROFILER AND CHARACTERISTICS OF THE FLOW AND BED
TOPOGRAPHY AT NARROW SEGMENT OF THE YOSHINO RIVER

武藤裕則¹・岡田将治²・張 浩³・萬矢敦啓⁴・工藤 俊⁴・原口 強⁵
Yasunori MUTO, Shoji OKADA, Hao Zhang,
Atsuhiko YOROZUYA, Shun KUDO and Tsuyoshi HARAGUCHI

¹正会員 Ph.D 徳島大学大学院教授 社会産業理工学研究部 (〒770-8501 徳島県徳島市新蔵町2-24)

²正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 准教授 ソーシャルデザイン工学科
(〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

³正会員 博士(工学) 高知大学准教授 教育研究部自然科学系農学部門
(〒783-8502 高知県南国市物部乙200)

⁴正会員 Ph.D 国立研究開発法人 国立研究開発法人 土木研究所 水工研究グループ
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁵正会員 博士(工学) 大阪市立大学大学院准教授 理学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

In order to determine the maximum depth to be scoured during flooding at the narrow segment at the Iwadu point of the Yoshino River in Japan, we conducted a study to measure the thickness of the sediment layer using a narrow multi-beam and a sub-bottom profiler. The sub-bottom profiler detected a consolidated silt layer at a depth of approximately 10 m below the riverbed. Results from a boring survey conducted at three different points for verification, found that the N value changed sharply at this layer, where estimates indicated the deepest riverbed level historically recorded. In addition, it was nearly the same value with the calculated bed level during the largest discharge condition in the past by the quasi-three dimensional flow analysis.

Key Words: narrow segment, bed topography, sub bottom profiler, narrow multi-beam survey,
estimated the historical lowest bed level

1. 序論

吉野川の基準地点である岩津では、上下流の川幅が500m以上に対して約150mの狭窄区間となっており、大規模出水時には水深が15m以上、流速が8m/sを超える流れとなり、過去には出水前後で6m以上の河床変動が生じた箇所もある。このような理由から当該区間における洪水時の正確な流量および上流側への水位のせき上げの影響の把握が長年にわたる治水上の課題となっている。

著者らは、河川管理者である国土交通省徳島河川国道事務所と連携し、洪水時の流況・河床変動特性を明らかにすることを目的として、平成27年度から過去の水文データの整理や現地調査を進めており、平成29年度以降

には当該区間において詳細な洪水流観測の実施を計画しており、さらに観測結果を再現できる解析モデルの構築を目指している。

本論文では、その課題に対する基礎検討として、岩津狭窄区間において洪水中にどの程度まで河床洗掘が生じているかを調べるために、詳細な河床地形が計測可能なナローマルチビームと従来海洋の地層探査で多く用いられてきたサブボトムプロファイラーにより、基礎地形および河床表面までの堆積層厚の調査を実施し、狭窄区間の堆積土砂の面的な把握を試みた。特に、サブボトムプロファイラーの河川への適用事例は国内では著者らの知る限りでは初めてであり、海外においては、例えば橋脚周りの洗掘履歴¹⁾、運河²⁾や貯水池³⁾における土砂堆積層



図-1 吉野川岩津付近(河口から34~45km)の平面図

厚の計測事例がある。

さらに、現地観測の対象とする流れの特徴を把握するために、詳細な河道地形データを用いた準3次元流況・河床変動解析を行い、既往の大規模出水時の縦断水面形および河床変動量から各流量規模における上流へのせき上げの影響を明らかにするとともに、出水中の最大洗掘深とサブボトムプロファイラーで推定された過去最低河床高との関係について考察した。

2. 吉野川岩津地点における近年の出水と横断河床形状の変化

図-1に吉野川岩津上下流区間の平面図を示す。岩津地点は、河口から約40kmに位置しており、上下流の河道幅に比べて狭窄部となっていることがわかる。岩津地点では、明治16年から水位観測が開始され、大正元年以降の流量観測の記録がある。昭和33年に第一岩津橋が竣工され、同36年に岩津水位観測所が現在の位置に移設された。岩津地点が高水観測場所として適切ではなかったことから、同41年に竣工された下流約4km地点の瀬詰大橋において、同43年から流量観測が開始され、岩津Hと瀬詰QによるH-Q関係の整理が行われている。図-2に近年では規模の大きい平成26年台風12号出水のピーク水位に近い8月3日16時頃に岩津地点の流況を示す。このときの岩津観測地点(水位標零点高：29.231m)における水位は6.52mであり、ピーク水位は同日18時の6.77mであった。避難判断水位が6.50m、はん濫危険水位が6.80mであることから、大規模な出水であったことがわかる。

この区間の河床形状をナローマルチビーム(Tekdyne Odom社：MB1)で計測した結果を図-3に示す。当該区間では、上流側の河道線形により左岸側に水衝部が生じており、川幅が大きくなる断面にかけて洗掘域が連続的に形成されている。図-4に40.20km断面における平成7年以降の定期横断測量結果を示す。測量年度によって河床高が低下・上昇が確認できる。特に、平成17年9月の測量結果では、平成16年に発生した大規模出水により最深部の河床高が15(A.P.m)まで低下している。最新の平成27年の測量結果では堆積傾向にあり、21(A.P.m)程度となっている。なお、吉野川基準高A.P.は、T.P.+0.833mである。



図-2 H26年8月台風12号出水時のピーク付近の流況 (撮影：徳島大学武藤)

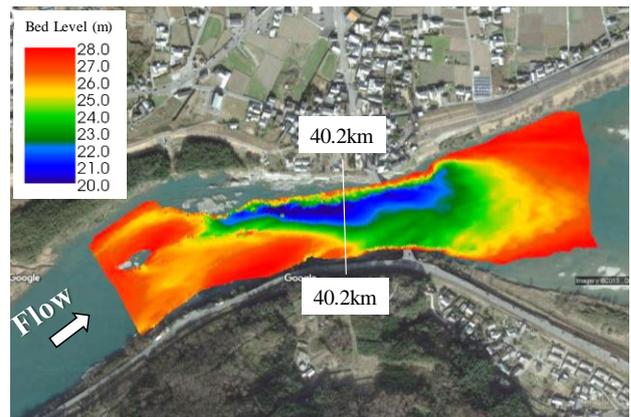


図-3 平成27年度にナローマルチビームで計測した岩津狭窄部付近の河床形状 (背景画像：Google Map)

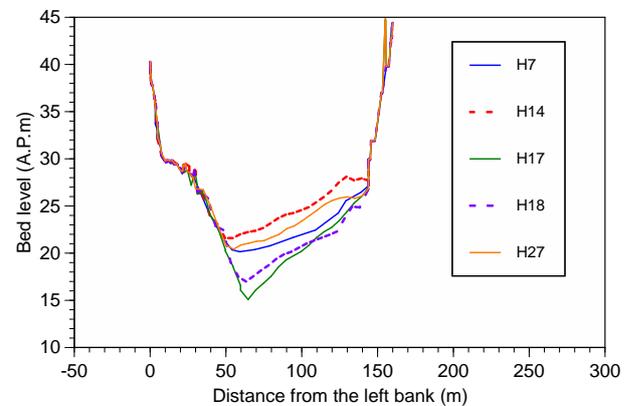


図-4 40.20km地点における横断河床形状の経年変化



図-5 サブボトムプロファイラー(低周波タイプ4素子使用)

表-1 サブボトムプロファイラー(低周波)の仕様

周波数	2~7kHz FMチャープ波
チャンネル数	2チャンネル
ピング間隔	15Hz
パルス長	5ミリ秒から60ミリ秒まで選択可
信号分解能	16bit
出力	各チャンネル最大4kW
ビーム角	円錐状 100°

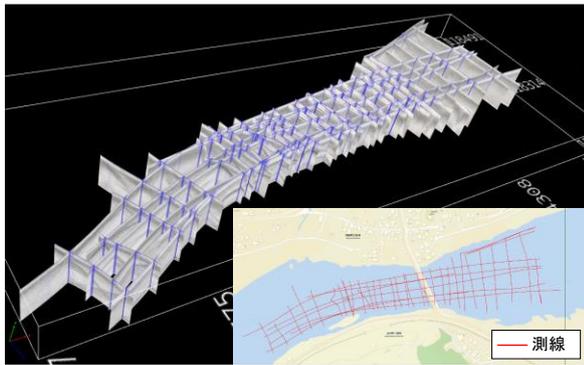


図-6 サブボトムプロファイラーの全測線の立体図

3. サブボトムプロファイラーによる地中探査およびボーリング調査

洪水中に洗掘が生じる最低河床高を把握するために、基礎地形(岩盤層)とその上に堆積する層厚の推定するために、サブボトムプロファイラーによる計測を行い、その精度検証データとしてのボーリング調査およびボーリング孔の鉛直方向の材料調査を実施した。

図-5にサブボトムプロファイラーの全景写真を、表-1に主な仕様を示す。本観測では、Teledyne Odom社製の低周波タイプのサブボトムプロファイラーを4素子使用している。計測原理は、FMチャープ波と呼ばれる周波数を変調させた音波(超音波)を送受信し、地層の密度変化によって生じる音響インピーダンス密度の変化を検出して地層の変わり目を探査する。

本観測で使用した機種は、従来難しいとされていた河川等の浅場(水深1.5m以上)においてもデータが取得でき、幅広い底質に対応していること、解像度が16bitと高いこ



図-7 ボーリングの実施箇所

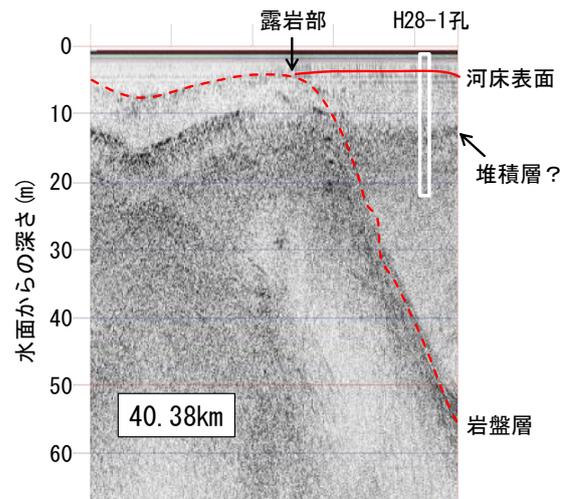


図-8 サブボトムプロファイラーの調査結果(40.38km)とボーリング調査(H28-1)実施箇所の位置

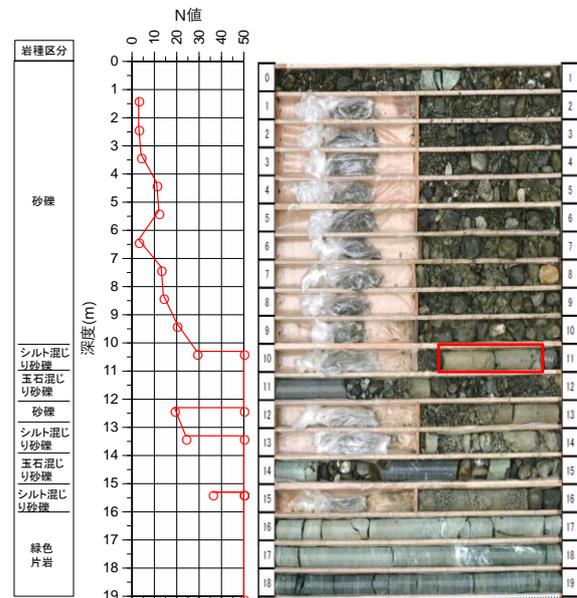


図-9 ボーリング調査結果(H28-1)

とが特長である。

調査範囲を39.80kmから40.60kmまでの0.8km区間として、図-6に示すように横断計測を31回、縦断計測を1回実施し、狭窄区間における過去最低河床高と堆積砂層厚の面

的な把握を試みた。また、サブボトムプロファイラーによる推定結果の検証を行うために、図-7に示す左岸側に露岩が確認できる40.38kおよび40.44k断面の3箇所をボーリング調査を実施した。

図-8に40.38km断面における調査結果とボーリング調査(H28-1孔)を実施した箇所の位置を示す。左岸側の露岩部から河道中央部へ落ち込むように連続的にみられるラインは、他の横断および縦断調査結果と整合性がとれていることから岩盤層であることが推定された。つぎに、ボーリング調査を実施したH28-1孔地点では、河床表面から約10mの深度に地層の密度変化を確認することができた。

この結果に基づいて、図-9に示すボーリング調査結果を考察する。河床表面から深度19mまでの岩種は、10mまでが砂礫であり、10mから16mの間ではシルト混じり砂礫や玉石混じり砂礫の岩種区分となる。16mよりも深では緑色片岩となっている。特に、図-8において密度変化が確認できた10m付近では、図-9に赤太線で囲んだ部分で十分に締め固まった厚さ30cm程度のシルト層が確認できた。N値もこの深度から30以上に大きくなっており、サブボトムプロファイラーの機器の特性上、深度16mからの岩盤層よりもこの深度の地質材料やN値の鉛直方向の変化を捉えたものと考えられる。同様に、H28-2孔およびH28-3孔についても河床表面付近に比べてN値が大きくなる深度において締め固まったシルト層が確認されており、このシルト層が長い期間洪水による洗掘を受けていない地層(過去最低河床高)と推定された。

以上より、サブボトムプロファイラーとボーリング調査結果に基づいて岩津狭窄部における過去最低河床高を推定することができた。この結果から各計測断面内で過去最低河床高が明らかに判別できる地点のみを抽出し、コンター図にしたものが図-10である。狭窄区間の最低河床高がより低い位置にあるため、図-3に示した河床高の凡例のレンジが異なるが、狭窄区間では水衝部の水深が大きい地点で10~12(A.P.m)となっており、周辺に比べて5~6m低くなっている。

図-11に狭窄区間の代表的な断面として40.00km、40.20kmおよび40.38kmにおける定期横断測量結果と過去最低河床高を重ねたものを示す。図-11(b)は図-4と対応しており、サブボトムプロファイラーにより推定された過去最低河床高は、近年で最も河床高が低下した平成17年の河床形状によりもさらに4m程度下方にあることがわかった。また、ボーリング調査を実施した図-11(c)の40.38km断面においても同程度で4m程度下方にあるが、図-11(a)の40.20km断面においては1m程度下方にある。定期横断測量結果は、出水後の河床形状であり、出水中には河床高がさらに低下している可能性が高いため、次章では準3次元河床変動解析を用いて洪水時の洗掘深について考察を行う。

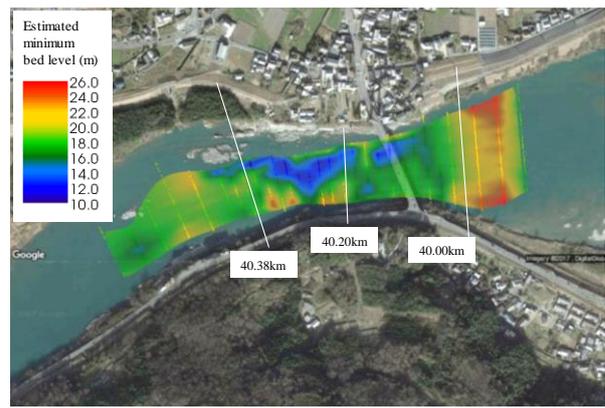
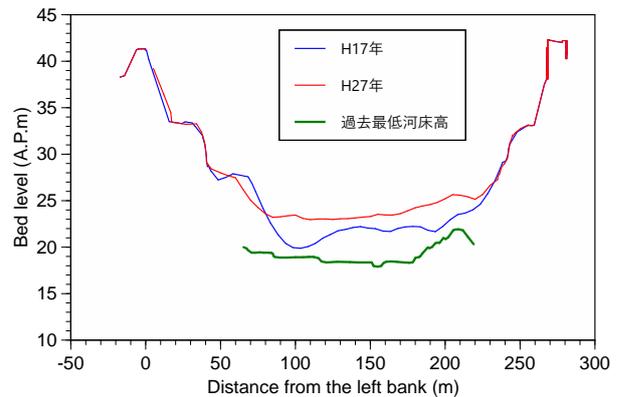
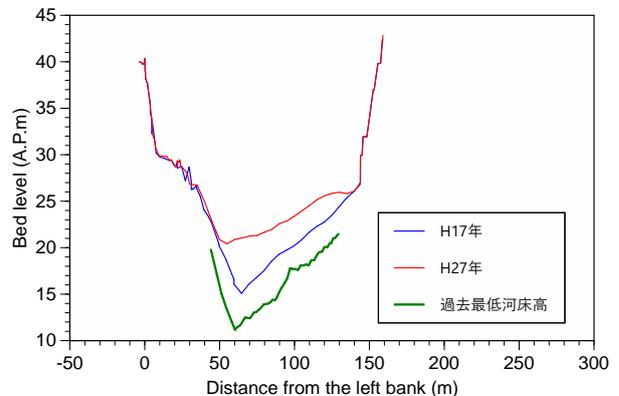


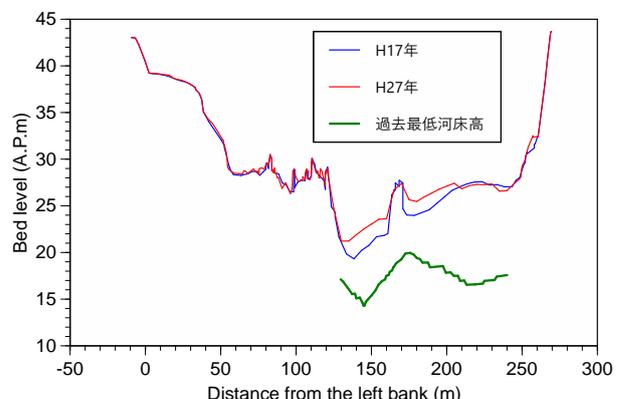
図-10 サブボトムプロファイラーにより推定された過去最低河床高コンター (背景画像: Google Map)



(a) 40.00km断面



(b) 40.20km断面



(c) 40.38km断面

図-11 近年の定期横断測量結果と推定過去最低河床高の比較

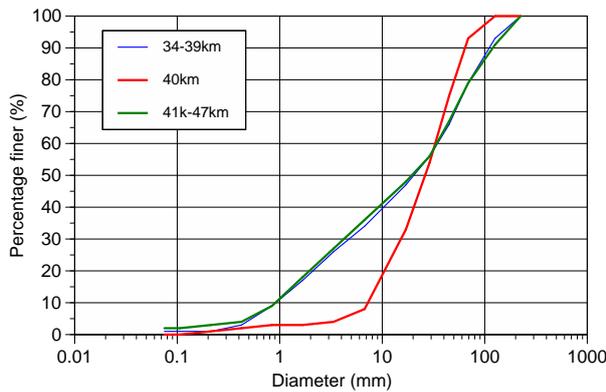


図-12 解析に用いた河床材料の粒径分布

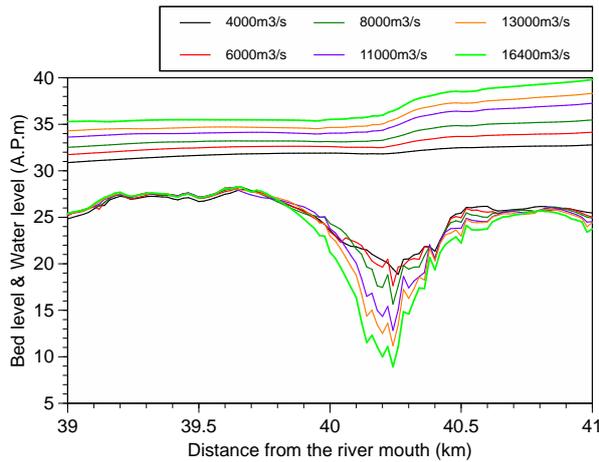


図-13 流量規模毎における縦断水面形と最低河床高(解析結果)

4. 準三次元河床変動解析による大規模出水時の流況・河床変動

吉野川では平成16年台風23号による出水により戦後最大流量(岩津ピーク流量16,400m³/s)を記録した。準3次元河床変動解析⁴⁵⁾により、出水時の流況と河床変動を再現し、3章で得られた過去最低河床高と比較する。ここでは、平成16年直前の平成14年定期測量よりも狭窄区間の詳細な河床形状データがある現況河床形状(平成27年)で実施する。なお、図-4に示すように、狭窄部においては現況河床の方が平成14年よりも1~2m低いことから、出水中の最低河床高も平成16年当時に比べて低下すると想定される。

(1) 解析条件

解析対象区間を34.0kmから47kmの13kmとし、初期河道は、平成28年度ALB(航空レーザ測深)データ(34.0~39.8km)、平成27年度ナローマルチビーム計測データ(39.8~40.6km)および平成23年度定期横断測量データ(40.6~47.0km)から作成した。

境界条件は、上流端に平成16年台風23号出水時のハイドログラフ(岩津地点で約16,400m³/s)、下流端に34.0km地点の通過流量に応じた水位をH-Q式から与えた。また、

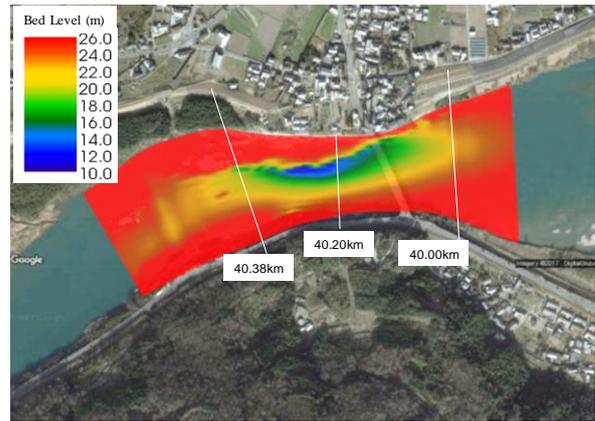
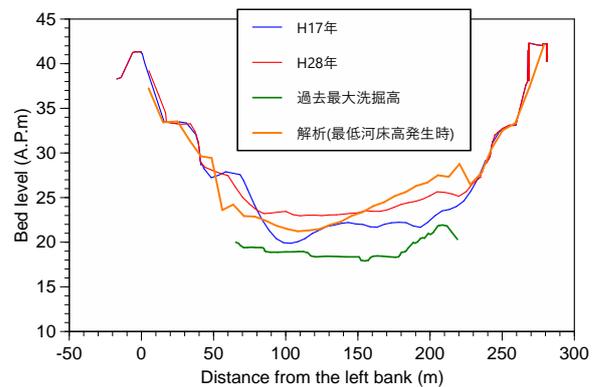
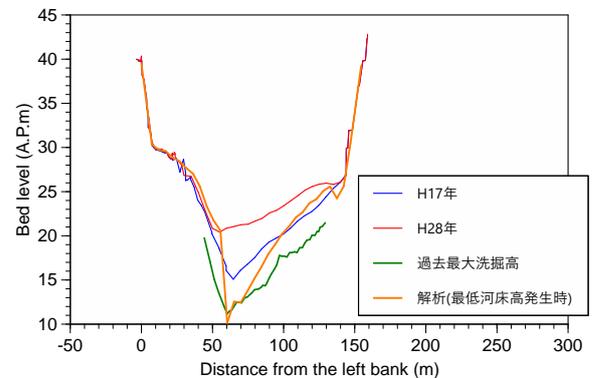


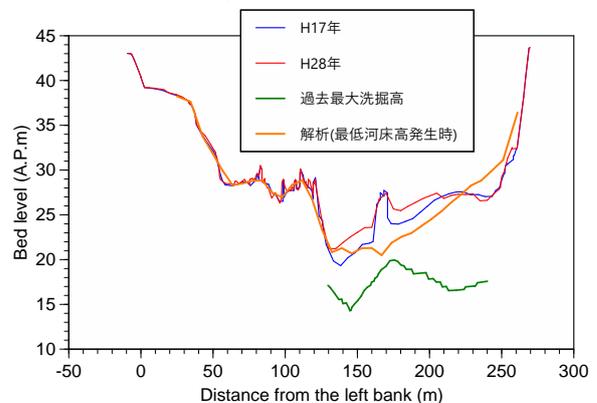
図-14 最低河床高が生じた時間における河床高コンター(解析結果：39.88~40.6km区間、背景画像：Google Map)



(a) 40.00km断面



(b) 40.20km断面



(c) 40.38km断面

図-15 近年の横断測量結果、推定過去最低河床高と解析結果(最低河床高発生時)の比較

支川の川田川、曾江谷川および穴吹川からの流入量として当該出水時の流出計算結果を与え、上流端の供給土砂量は47km断面の平衡流砂量とした。粗度係数は過去に実施された当該出水時の痕跡水位を再現するように低水路(0.032(34.0-40.0km), 0.029(40.0-47.0km)), 高水敷(0.020-0.080)にそれぞれ設定し、河床材料粒径は図-12に示す平成23年度調査結果から岩津狭窄区間(40km)とその上下流(34~39km, 41~47km)の3区間に分けて設定した。

(2) 流量規模の違いによる縦断水面形および最低河床高

図-12に解析から得られた各流量規模の縦断水面形と断面最低河床高を示す。岩津狭窄部においては、流量が4,000m³/sまでは上下流に水位差が見られていないものの、河床変動が生じ始める4,000~6,000m³/sにおいて狭窄部の水面勾配が徐々に大きくなっている。11,000m³/s程度を超えるとさらにせき上げの影響が強まり、上下流の水位差が2m程度生じている。狭窄部河道中央部における水深平均流速も流量が4000m³/sのときに3m/s, 5000m³/sで3.5m/sであったが、水面勾配が急になる6000m³/sでは4.5m/sと急激に増大している。

(3) 洪水時の最深河床高とサブボトムプロファイラーから推定された過去最低河床高の比較

図-14に40.24km断面において最深河床高が生じた時間ステップにおける河床高コンターを示す。最深河床高となる箇所では、初期河床高から約10m低下している。

図-15に図-11の平成17年、28年の横断測量結果と3章で明らかとなった過去最低河床高の比較に解析結果の最大洗掘発生時の横断河床形状を追加したものを示す。ここで、平成27年の河床形状が解析の初期河床となっている。図-15(a)40.0kmと(c)40.38kmについては、解析結果の最低河床高よりも過去最大洗掘高の方が下方にあるが、狭窄部で洪水時の河床変動が大きいと考えられる図-15(b)40.2kmでは最低河床高が初期河床から9.4m低下し、推定された過去最低河床高と同程度となることがわかった。

5. 結論

吉野川の基準地点である岩津狭窄部における流況・河床変動特性を把握するために、現地調査および準三次元モデルによる河床変動解析を実施した。本論文で明らかとなった点を以下にまとめる。

- 1) サブボトムプロファイラーにより河床表面から約10mの深度に地層の密度変化を確認し、ポーリング調査の結果から十分に締め固まった厚さ30cm程度のシルト層が確認できた。この地層の高さを過去最低河床高と定義し、この結果に基づいて岩津狭窄部における過去最低河床高を面的に推定することができた。
- 2) ALBおよびナローマルチビームを用いて計測した現況

の河床形状を初期河床として、平成16年台風23号を対象に準三次元河床変動解析を実施した。その結果、岩津狭窄部においては、流量が4,000m³/sまでは上下流に水位差が見られないものの、それよりも流量が多くなると、狭窄部の水面勾配が徐々に大きくなって流速が増大し、河床変動が生じ始めることがわかった。また、流量が11,000m³/s程度を超えると、せき上げの影響が強まって狭窄部の上下流の水位差が2m程度生じることがわかった。この結果から、洪水観測を実施する際に対象とする流量規模を4000m³/s以上とした。

- 3) 準三次元河床変動解析結果において、狭窄部の20.24kmにおいて生じた最低河床高は、サブボトムプロファイラーで推定された過去最低河床高と同程度まで低下することが示唆された。今後、平成16年台風23号出水規模の洪水が発生した場合には、このような状況が生じる可能性もあることから、出水中の各流量規模における河床形状が把握できれば、解析モデルの精度検証も含め、当該区間における流れと河床変動の現象解明につながるものと考えられる。

謝辞：本研究は平成27年度よりスタートした「吉野川岩津狭窄部における洪水時の河床変動に関する研究会」のこれまでの成果の一部をとりまとめたものである。河川管理者である国土交通省徳島河川国道事務所には、航空写真および現地調査データの提供、現地調査に際して多大なご協力をいただいた。また、(株)ハイドロシステム開発には、サブボトムプロファイラーの現地調査およびデータ解析に関する技術協力をいただいた。記してここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Gary Placzek and F.P. Haeni: Surface geophysical techniques used to detect existing and infilled scour holes near bridge piers, USGS Water-Resources Investigation Report 95-4009, 1995.
- 2) Kress, W. H., Dietsch, B. J., Steele, G. V., & Cannia, J. C.: Use of continuous seismic profiling to differentiate geologic deposits underlying selected canals in Central and Western Nebraska, U.S. Geological Survey Fact Sheet, 115-03, 2004.
- 3) Flocks, J., Kelso, K., Fosness, R., & Welcker, C.: Seismic profile analysis of sediment deposits in Brownlee and Hells Canyon Reservoirs Near Cambridge, Idaho, U.S. Geological Survey Open-File Report, 2014-1019, 2014.
- 4) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水方程式と渦度方程式を連立させた準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用, 水工学論文集, 第53巻, pp.1081-1086, 2009.
- 5) 岡村誠司, 岡部和憲, 福岡捷二: 洪水時の縦断水面形変化と準三次元流解析法を用いた石狩川河口部の洪水時の河床変動解析, 河川技術論文集, 第16巻, pp.125-130, 2010.

(2017.4.3受付)