

河床高データの解像度と計算格子サイズが 河床変動解析に及ぼす影響に関する検討

EFFECT OF RESOLUTION OF RIVER BED ELEVATION DATA AND MESH SIZE ON RIVERBED VARIATION ANALYSIS

中山彰人¹・赤穂良輔²・前野詩朗³・吉田圭介⁴
Akito NAKAYAMA, Ryosuke AKOH, Shiro MAENO and Keisuke YOSHIDA

¹学生会員 岡山大学大学院 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1)

²正会員 岡山大学大学院准教授 環境生命科学研究科 (同上)

³フェロー会員 岡山大学大学院教授 環境生命科学研究科(同上)

⁴正会員 岡山大学大学院准教授 環境生命科学研究科(同上)

Recently, Airborne Laser Bathymetry (ALB) survey that can obtain high-resolution riverbed elevation data including underwater has attracted attention as an alternative technique for cross-sectional survey. In this study, we evaluated the effect of variations of computational mesh size and bed elevation data resolution on the numerical results. As a result, it is clear that the reproducibility for riverbed deformation characteristics can be improved by using finer mesh size, only when ALB data was used. Especially, in order to reproduce the characteristics of riverbed deformation in the curved compound channel, it is necessary to improve the local flow velocity and direction by using a mesh size of 10 m or less.

Key Words : Airborne Laser Bathymetry, riverbed variation analysis, periodic cross-sectional survey

1. 序論

現在の実河川を対象とした平面二次元河床変動解析に用いる河床高は、200m毎の定期横断測量データを10-25m程度の計算格子に内挿して作成されるのが一般的である。そのため、河床変動解析の面的な再現性について定性的な比較は行えるが、定量的な検証は難しい。一方、近年開発が進められている緑色波長域のレーザー光を併用した航空レーザー測深(ALB: Airborne Laser Bathymetry)は、従来では得られなかった水面下の詳細な河床形状を計測することが出来るため、定期横断測量に代わる代替技術として注目されている^{1) 2)}。

吉田ら³⁾は、岡山県旭川の河道内の水深約5m以下の領域について、鉛直方向の測深誤差約5cm以下で、平面解像度2m程度のデータを取得可能であることを示しており、さらに同データを利用した河道管理に関する研究⁴⁾も行われている。また、ALBデータを使った流況解析^{5) 6)}では、横断面内の流速分布の再現性が改善し、河床変動解析への影響が示唆されており、ALBデータの有用性が示されている。ここで、格子サイズは、対象領域の川幅や河道内

地形、水深に対する相対的なスケールより決められるのが一般的である。一方、上述の検討^{3) 5)}では、各対象領域で過去に行われた解析と比較して小さい格子サイズを用いた解析が行われており、格子サイズの違いについては十分な検討がなされていない。

そこで、本研究では、徳島県吉野川を対象に、河床高データの解像度と計算格子サイズを変えた複数の河床変動解析を実施し、解析結果への影響を検証し、ALBデータの実務利用に対する知見を示すことを目的とする。解析には河川シミュレーションソフトiRICに含まれる平面二次元ソルバーNays2DH⁷⁾を使用した。本論文では、(1)洪水前後の河床形状の再現性、(2)ピーク流量時における流況解析への影響、(3)洪水後の河床変動量への影響、の3項目の検討結果について述べる。

2. 対象領域及び解析に用いる地形条件の概要

解析範囲(図-1)は低水路湾曲部に伴う交互砂州を含む区間1(16KP-19.2KP)と第十堰を含む区間2(12KP-15.4KP)の2箇所を設定した。川幅は両区間とも約800mである。両

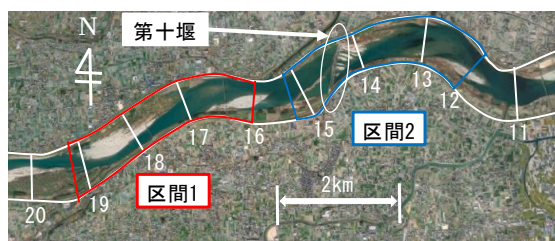


図-1 解析範囲 (Google Mapより)

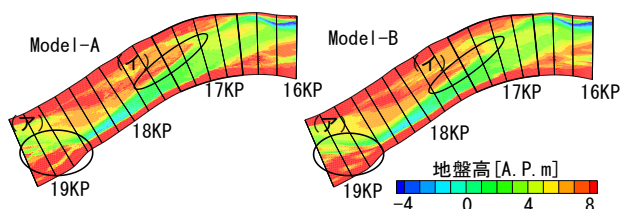


図-2 区間1の地盤高 (10m格子)

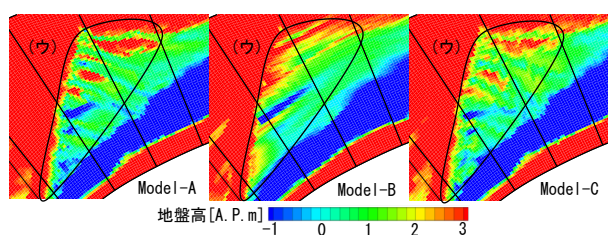


図-3 区間2の地盤高 (10m格子)

区間では、平成25年10月と平成27年3月にALBデータが取得されており、洪水前後の河床変動量を詳細に検討可能である。2回の計測の間に発生した大きな出水は平成26年8月台風11号、12号洪水であり、吉野川の計画高水量 $16,600\text{m}^3/\text{s}$ に対し、両洪水ともピーク流量は約 $10,000\text{m}^3/\text{s}$ と比較的大きな洪水であった。本研究では両洪水を対象として解析を行った。

河床高データには、区間1については水平方向解像度2mのALBデータ(Model-A)と200m毎の定期横断測量データ(Model-B)の2種類を用いた。一方、区間2については、第十堰周辺のみ25-100m毎の横断測量データにしたModel-Cを加えた計3種類を用いた。横断測量データは、平成23年12月と平成24年3月に取得された。また、両区間ともに、格子サイズは10m、25m、50mの3種類を用いた。ここで10m格子は、既往研究のALBデータを用いた解析^{3) 5)}と相対的なスケールが同程度の格子サイズ、25m格子および50m格子は、横断測量データを用いた解析と同程度の格子サイズに相当し、川幅に対する分割数 N_B はそれぞれ80、32、16である。なお、各Modelとも、横断測線を格子サイズに応じて等間隔分割し作成した同一の計算格子を用いた。

地盤高の内挿は、ALBデータを用いるModel-Aでは、計算格子点に近い4点のALBデータを抽出し、格子点と各ALBデータ測点の距離の逆数を重みとした重み付き平均より与えた。一方、横断測量データを用いるModel-B、Model-Cでは、まず、横断測線上の隣接する2つの測点から格子点へ線形内挿し、さらに測線間の各格子点へ線形

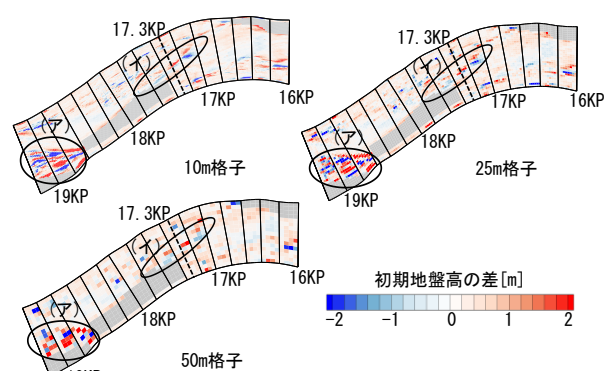


図-4 区間1のModel-AとModel-Bの初期地盤高の差

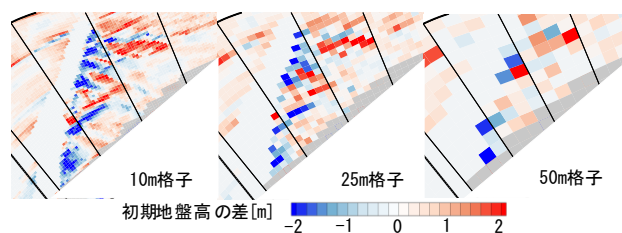


図-5 区間2のModel-AとModel-Bの初期地盤高の差

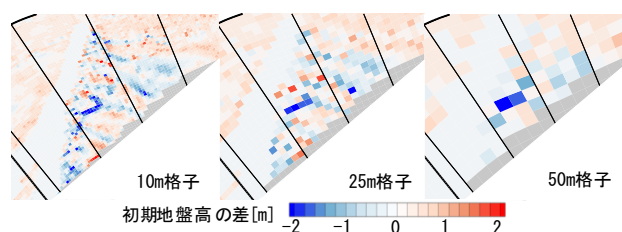


図-6 区間2のModel-AとModel-Cの初期地盤高の差

内挿することで、面的な地盤高データを作成した。既往の研究^{1) 2) 3) 5)}で、ALBデータの精度は実測の横断測量成果に対し、平均較差約0.1m以内で取得可能であることが分かっている。よって、本研究では、ALBデータを実際の現地取得された測量成果と同一であると仮定し、ALBデータを各格子サイズに内挿した河道全体の地盤高を仮の真値として以降の比較を行うこととする。

3. 河床形状に関する検討

本章では、平成25年10月に取得された地盤高(初期地盤高)および平成27年3月に取得された地盤高との差分(河床変動量)について検討を行う。なお、平成25年10月の計測では水深約6m以深でALBデータの欠測(後出の図-4, 5, 6灰色部分)が生じており、欠測箇所は横断測量データより内挿したため、本研究の比較対象外とする。また、平成27年の定期横断測量は実施されていないため、横断線ごとにALBデータを内挿し、線形内挿によって面的な地盤高データを作成した。

(1) 初期地盤高

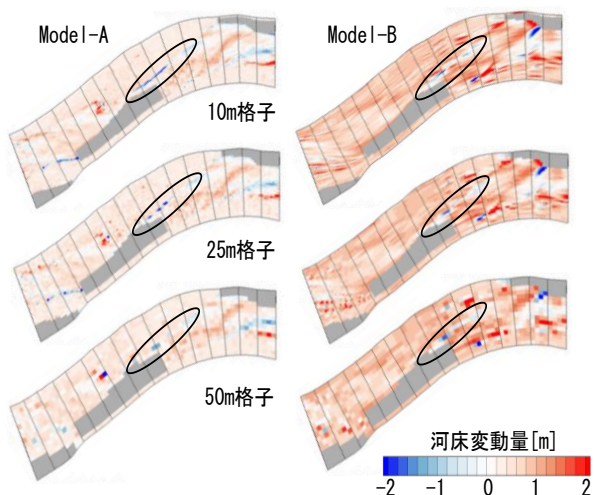


図-7 区間1の洪水前後の河床高より算出した河床変動量

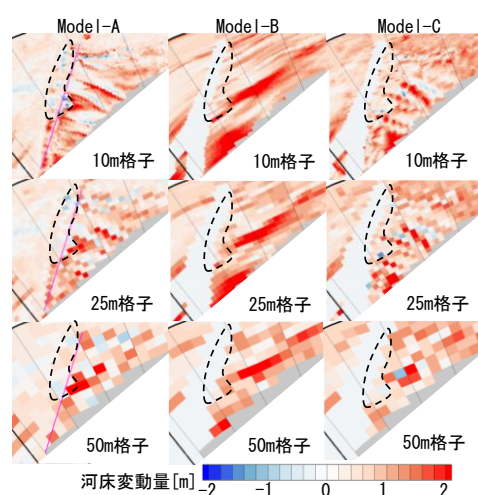


図-8 区間2の洪水前後の河床高より算出した河床変動量

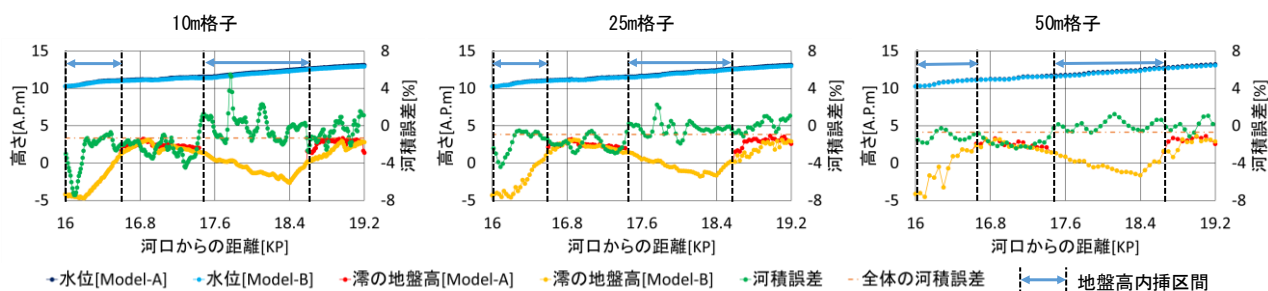


図-9 区間1の縦断水位および河積誤差

図-2, 3に10m格子の場合の各Modelを用いた初期地盤高を示す。区間1では、Model-BはModel-Aと比較して全体的に平滑化しているものの、河床形状の特徴は概ね良好に一致している。一方、区間2では堰下流で横断方向に列状に形成された砂州がModel-A, Cでは表現できているのに対し、Model-Bでは表現できていないことが確認できる。

格子サイズの違いによる局所的な河床地形の再現性について検証するために、区間1, 2におけるModel-AとModel-Bの地盤高の差分を図-4, 5に示す。Model-Bを用いた場合は、図-2中の(ア)列状の砂州部、(イ)砂州縁部、図-3中の(ウ)構造物下流部で、最大2m以上の誤差が生じていることが確認できる。また、図-6に示すModel-CとModel-Aの差分は、図-5と比較して、面的な再現性が向上しており、誤差が最大2m以上改善している箇所が確認できる。

このように、ALB測量データとの比較より、横断測量の測線間距離が面的な再現性に及ぼす影響を定量的に評価可能であることが示された。

(2) 河床変動量

図-7, 8にModel-AおよびModel-Bを用いた場合の河床変動量分布を示す。区間1のModel-Aでは、いずれの格子サイズも全体的に堆積傾向を示した。ただし、格子サイズを細かくすることで局所的な河床変動が現れ、10m格子では図-7の黒枠に示す下流側の砂州の川縁で最大2m程度の洗掘が500mに渡り生じたことが明らかとなった。一方、

Model-Bは全体的に堆積量が過大であることが示された。また、上述の下流側の砂州の川縁の洗掘は確認できるものの、範囲は半分以下となっており、格子サイズを小さくしても再現性は改善されていない。図-8に示す区間2についても河床高データ及び格子サイズの違いによる河床変動の特徴が確認できる。特に10m格子では、Model-Aの黒枠内に見られる堰直下の局所的な洗掘がModel-B, Model-Cともに現れなかった。

以上のように、Model-Aは、水平方向解像度が2m程度の詳細な河床変動量を示しており、従来の現地研究で行われてきた解析結果と定性的な河床変動傾向の比較や局所的な河床変動量の定量的な比較を行うだけでなく、面的な河床変動量の定量的な評価が可能となる。

4. 流況解析に及ぼす影響に関する検討

本章では、区間1について、対象洪水のピーク時における上流端流量および下流端水位を与え、固定性として定常流解析を行い、河床高データおよび格子サイズの違いによる流況解析結果への影響について検討した。なお、粗度係数は、既往の文献⁷⁾及び試行計算より高水敷 $0.038[m^{-1/3}s]$ 、低水路 $0.030[m^{-1/3}s]$ とした。

(1) 縦断水位分布および河積誤差

滞筋の縦断水位と地盤高を図-9に示す。Model-Aと

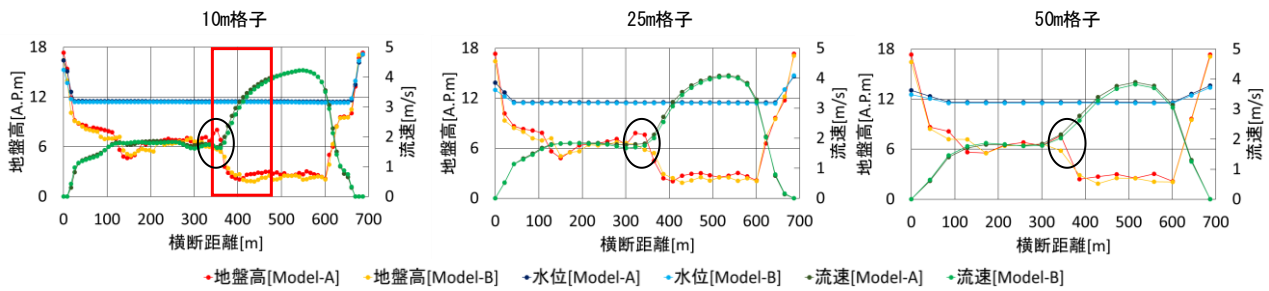


図-10 17.3KP (図-4中の黒点線) における横断面内の流速分布

Model-Bの水位差は各格子サイズとも最大15cm程度とほとんど差はなく、河床高データの違いによる水位への影響は小さいことが示された。一方、同図の緑線は横断面ごとのModel-A, Bの河積誤差の縦断分布を示しており、格子サイズが小さいほど大きく、最大7%程度の差異が生じた。ただし、区間1全体の河積誤差は1%程度と全体に対する河積の影響は小さいと考えられる。

(2) 流速および流向

図-4に黒点線で示した下流側の砂州の川縁に位置する横断面(17.3KP)内の水位および流速分布および地盤高を図-10に示す。水位分布は格子サイズに関わらずほぼ一致するのに対し、流速分布は、10m格子の場合は河床洗掘が生じた低水路左岸側(図-10赤枠部)で大きく、高水敷との流速差が増大する分布を示した。一方、Model-AとModel-Bの結果を比較すると、河床高は低水路左岸側(図-10黒枠部)で最大2m程度差異が生じているのに対し、流速分布は概ね一致していることが分かる。

次に、Model-AとModel-Bの解析で得られた流向 θ ($=v/u$, u : 流速のx方向成分, v : 流速のy方向成分) の差の縦断分布を図-11に示す。50m格子の場合、Model-AとModel-Bの流向は概ね一致しているのに対し、25m, 10m格子は全体的にばらつきが生じ、特に10m格子は、図-4に黒点線で示した横断面付近の河床高の差が大きい箇所、流向の差異が大きくなる傾向が確認できる。

以上のことから、地盤高の差異による流速への影響は局所的で、流向に対して影響が大きくなることが明らかとなった。

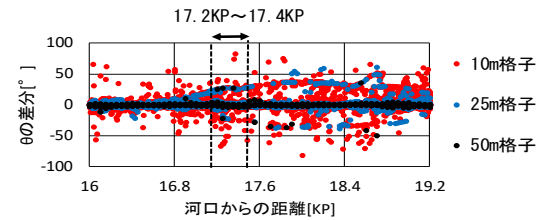


図-11 流向差の縦断分布

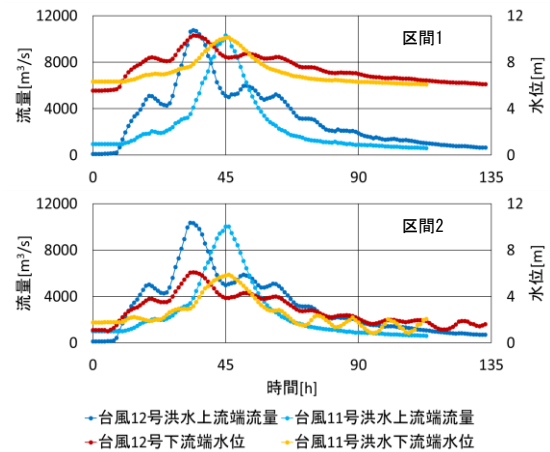


図-12 境界条件

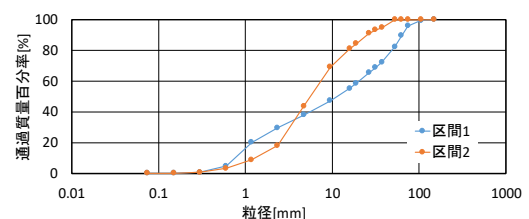


図-13 粒度分布図

5. 河床変動解析への影響に関する検討

本来、平成26年8月台風11号、12号洪水は約5日間の減衰期を経て連続して起こっている。しかし、両洪水を連続して計算を行うには計算負荷の都合上、現実的ではなかったため、本章では両洪水を2回分の上下流端境界条件として与え(図-12)、区間1, 2について、非定常洪水流解析及び河床変動解析を行った。区間1, 2の上下流端境界条件は、両区間を含む範囲(1.8KP-21.4KP)で40m格子を用いた非定常洪水流解析を行い、各境界断面で抽出した

流量、水位をそれぞれ与えている。台風11号洪水の初期地形は、台風12号洪水の河床変動解析で得られた河床変動量を元に地盤高データを作成した。粒度分布は、国土交通省四国地方整備局徳島河川事務所の現地調査の結果に基づき、図-13の分布を一樣に与えた。また、粗度係数は、区間1は前章と同様に与え、区間2は高水敷 $0.038[m^{-1/3}s]$ 、低水路 $0.026[m^{-1/3}s]$ とした。また、対象河川の吉野川は粒径の細かい土砂が多く、浮遊砂の影響は無視できないと考えられるため、流砂の計算には掃流砂浮遊砂両方を考慮した。掃流砂量式は芦田・道上式を用い、浮遊砂

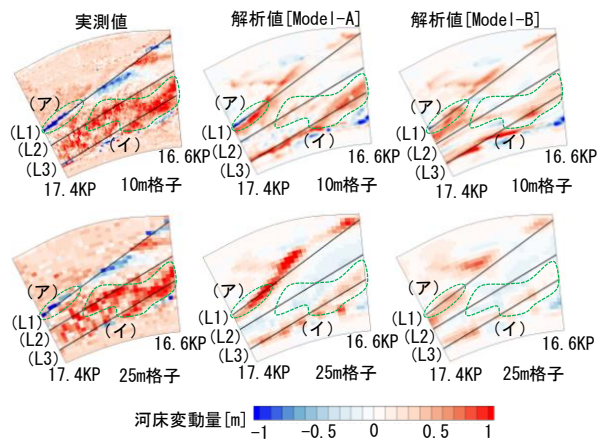


図-14 16.6KP-17.4KPの河床変動傾向

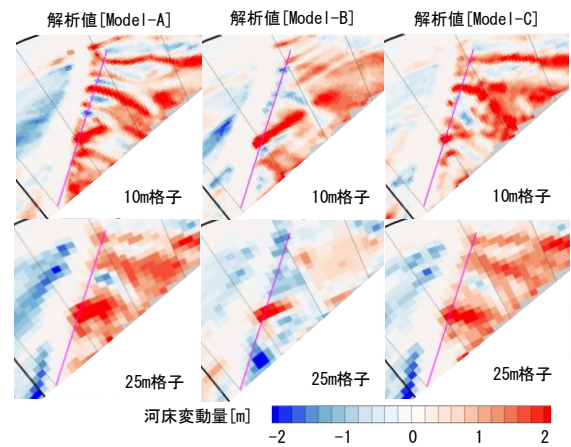


図-16 堰直下における河床変動傾向の違い

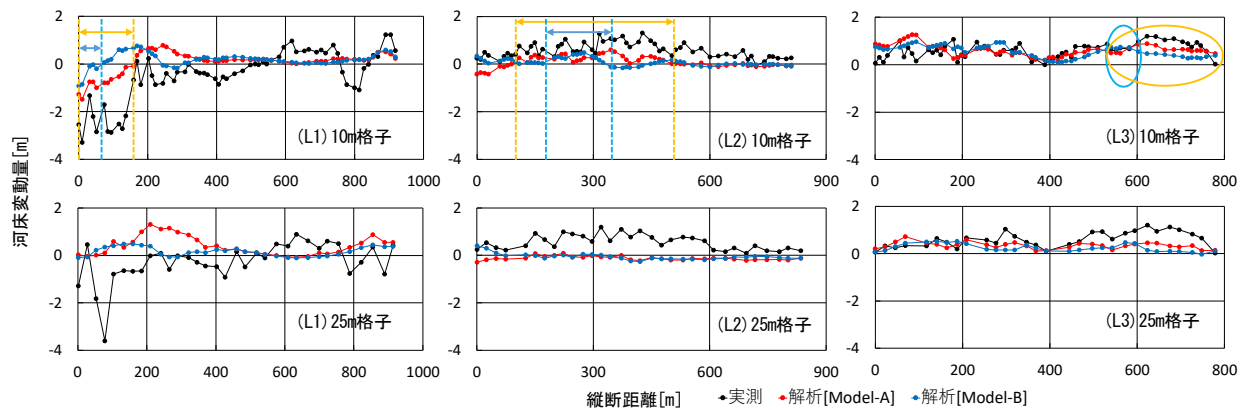


図-15 (a)~(c)のライン上の河床変動量

浮上量式にはLane-Kalinskeの式を用いた⁶⁾。

(1) 区間1の低水路湾曲部における河床変動特性

本節では、ALBデータ欠測箇所のない16.6KP-17.4KPを対象として、定期横断測量で用いられる200m毎の横断測量データとALBデータの違いによる河床変動解析結果への影響について検討を行う。図-14に洪水後の河床変動量分布を示す。10m格子を用いた場合のModel-AとModel-Bの解析結果を比較すると、両Modelとも河床変動量は実測値と比較して半分程度となっている。一方、洗掘箇所および堆積箇所の分布は差異が生じており、図中に示す(ア)上流側の低水路左岸における洗掘と、(イ)低水路中央から右岸にかけての堆積傾向について、Model-Aの再現性が高くなっていることがわかる。一方、25m格子を用いた場合は、Model-AとModel-Bの解析結果に差異は生じるものの、上述の河床変動の特徴に対する再現性は向上していないことが明らかである。

次に、定量的な再現性を検討するために、図-14中に示す低水路左岸(L1)、低水路中央(L2)、低水路右岸(L3)に位置する3直線上の縦断的な河床変動量を図-15に示す。まず、10m格子を用いた場合の解析結果について比較すると、以下のような違いが確認できる。(L1)上流側の洗掘範囲がModel-B(水色点線部)と比較して、Model-A(黄色

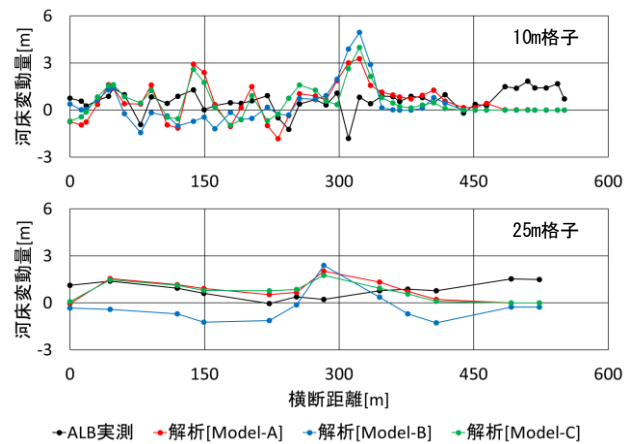


図-17 堰直下における河床変動量の横断分布

点線部)は約100m下流側に広がっている。実測値と比較し半分程度ではあるが、再現性が向上している。(L2)堆積範囲がModel-B(水色点線部)と比較して、Model-A(黄色点線部)は約150m広く、また分布の特徴もより実測値に近い形状となっている。(L3)上流から600mより下流側の堆積部について、Model-Bでは約700mの位置(青枠)で堆積量が最大となるのに対し、Model-Aは実測値と同様に下流側までほぼ一様に堆積している。一方、25m格子を用いた場合は、両モデルとも(L1)、(L2)、(L3)の河床変動

特性について明確な差異が生じていない。

前章で示した流況に及ぼす影響を踏まえると、L1の差異は流速の再現性による影響が大きく、L2,L3の差異は流向の再現性による影響が大きいと考えられる。すなわち、砂州下縁部における洗掘は局所的な河床地形、砂州上縁部の堆積は河床形状の連続性が大きく影響していると考えられる。これらの河床地形の特徴を表現するためには、ALBデータを利用するだけでなく、相対的なスケールが局所的な河床地形と同程度となる10m程度の計算格子を用いる必要があることが示された。

(2) 区間2の堰下流側における河床変動特性

本節では、第十堰下流側を対象として、25m毎の横断測量データとALBデータの違いによる河床変動解析結果への影響について検討を行う。図-16に洪水後の第十堰下流の河床変動量分布を示す。10m格子を用いた場合、図-8に示したALBによる実測値と比較し、Model-Aは列状の堆積部分を良好に再現できている。また、Model-Bと比較してModel-Cは再現性が大きく改善が確認でき、25m程度の細かい横断測量データ利用の有効性が示されている。ただし、Model-Aと比較すると、Model-Cは列状に形成された砂州が水の流下方向に対して不連続になっている部分が確認できる。一方、25m格子を用いた場合は、Model-AとModel-Cはほぼ同様の結果が得られており、前節と同様にALBデータ利用の優位性は10m程度の格子サイズが必要であることが示された。

次に、図-16に示す10m格子を用いた場合の、堰直下の横断面の河床変動量を図-17に示す。堆積箇所については、Model-AとModel-Bの結果は概ね一致しているのに対し、洗掘箇所はModel-Aの方が洗掘量は大きくなっている。Model-Aの最大洗掘深は-1.82mであり、実測値の-1.8mとほぼ同程度となった。ただし、洗掘箇所と堆積箇所の横断方向の位置は大きくずれており、本研究で用いた最も細かい計算格子と高解像度の河床高データを用いても再現することができないことが示された。

以上より、実河川を対象とした洪水流解析で一般的に用いられている計算格子サイズでは、構造物周辺の局所的な河床変動については、高解像度の地形データを離床しても十分な再現性が得られないことが明らかとなった。このような局所的な河床変動解析へのALBデータ利用の有効性を検証するために、今後、解析範囲を構造物周辺に限定し、より細かい格子サイズを用いた二次元解析や三次元解析を用いた検討を行う必要がある。

6. 結論

本研究では、吉野川における平成26年8月台風11号、12号洪水を対象として、計算格子サイズと河床高データの違いによる河床変動解析への影響について検討を行っ

た。本研究の主要な結論は以下の3つである。

- (1) 200m毎の横断測量データを用いた場合、低水路の遷移部のみでなく、列状の砂州部や砂州縁部、構造物下流部での河床形状の再現性が低下し、最大2m以上の差異が生じることが明らかとなり、ALBデータによる面的なデータ取得の重要性が示された。
- (2) 河床地形の再現性が流況解析へ及ぼす影響を検討した結果、水位の差異は格子サイズによらず非常に小さいのに対し、流速と流向への影響は格子サイズによって大きく異なることが示された。特に流向への影響は10m格子を用いた場合に最大90°程度の差異が生じることが示された。
- (3) 河床地形の再現性が河床変動解析へ及ぼす影響を検討した結果、10m格子を用いた場合にのみ再現性の向上が確認でき、流速のみでなく流向の再現性に大きく依存していることが示された。

以上のように、実河川においては川幅等により計算格子サイズが制限されるものの、局所的な河床地形の面的な連続性が表現できる格子サイズが確保できれば大きな改善効果が確認され、ALBデータより計測した面的な河床地形や変動量は、今後河川整備を行う上で有用な情報である。また、河床変動解析に関する学術的な検討をする際に面的なデータを用いることにより、非常に重要な知見が得られる可能性がある。

謝辞：国土交通省四国地方整備局徳島河川事務所には貴重なデータを頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 岡部貴之，坂下裕明，小澤淳真，下村博之，蒲恒太郎，宮作尚宏，川村裕，浅沼市男：ALBの河川縦横断測量への適用性の研究，河川技術論文集，第20巻，pp. 55-60, 2014.
- 2) 山本一浩，中村圭吾，福岡浩史，戸村健太郎，金田真一：グリーンレーザ(ALB)を用いた河川測量の試み，河川技術論文集，第23巻，pp. 293-298, 2017.
- 3) 吉田圭介，前野詩朗，間野耕司，山口華穂，赤穂良輔：ALBを用いた河道地形計測の精度検証と流況解析の改善効果の検討，水工学論文集，第61巻，pp. 565-570, 2017.
- 4) 吉田圭介，前野詩朗，小川修平，井関禎之，赤穂良輔：ALB点群を用いた樹木群の密生度算定法の検討，水工学論文集，第62巻，pp. 547-552, 2018.
- 5) 岡部貴之，山崎崇徳，小澤淳真，森田真一，堀内成郎，竹林洋史：3次スプライン曲線によるALB欠測領域の河床位補間の精度と流れの影響，水工学論文集，第62巻，pp. 859-864, 2018.
- 6) Nays2DH Solver Manual, <http://i-ric.org/ja/download/get/yis28y>.
- 7) 徳島県吉野川第十堰改築計画に関する質問答弁書 <http://www.sangin.go.jp/japanese/joho1/kousei/syuisyo/141/touh/t141003.htm>.

(2018. 4. 3受付)