# 水中の河床地形の面的計測とその活用方策について(続報) UTILIZATION OF RIVERBED SURFACE MEASUREMENT DATA FOR RIVER MANAGEMENT

秋田 麗子 \*・西口 亮太 \*・野間口 芳希 \*・佐藤 隆洋 \*\* Reiko AKITA, Ryota NISHIGUCHI, Yoshiki NOMAGUCHI and Takahiro SATO

Conventionally, riverbed topography has been measured for each cross-section by 200 m pitch. In recent years, due to the improvement of measuring technology, two-dimensional surface measurement has become possible. The spatial density of measured topography data has become several 10 to 1,000 times higher than conventional measurement. In this paper, we review specific examples of strategies and general considerations to utilize surface measurement data of riverbed topography for river management. As a specific example, we analyzed the result of riverbed topography by swath-type sounder at the downstream of Shonai River. The case study of detection and monitoring of the deformation, to grasp the amount of change from the temporal variation of the measurement, and to grasp the bars and dunes. We also complied the spatial resolution and measurement cost.

**Keywords** : river bed topography, river management, A high-resolution side scan imaging with bathymetry

# 1. はじめに

近年、3次元サイドスキャンソナーに加え、ALB 測深<sup>1),2)</sup> や写真画像を用いた SfM 技術<sup>3)-6)</sup>が実用化され始め、水中 の河床地形を様々な手法で面的に計測することが可能となっ た。筆者らは、2015年9月に庄内川下流域において河床地 形の面的計測を行ったが、この計測データをうまく可視化処理 することで、これまで未知であった現地河川の水中下の状況が 「見える」ことを確認した。

このような河床のビッグデータが、河川管理の実務にも有効 に役立てられることを示すため、前報<sup>77</sup>において河川管理へ の活用事例に関するケーススタディを示した。本稿では、これ に調査手法の選定にあたっての留意事項を追加し、より実務 での活用に資するよう整理し直したものである。

# 2. 現地観測概要

計測範囲は庄内川の距離標 7~12kmの区間(延長約 5km)である(図-1)。河床勾配は約1/2,000、水面幅は 約150m、平均潮位時の水深は1~3mである。感潮域であり、 一日の中で最大 2m 程度の水位変動がある。

計測にはスワス式測深機(製品名 C3D-LPM)を用いた。 本機種はセンサー部から180度の広い範囲の情報が得られる という特性がある。ゴムボートにスワス式測深機、GPS、動揺 センサを固定し、水深、平面位置、船の動揺を同時に計測した。 また5地点で水位計測を行った。

計測区間は8ブロックに区切り、ブロックごとに、計測値が 相互にラップし、空白域が生じないよう縦断的に往復すること で計測を行った(図-1)。結果的に、一断面あたりの測線は 平均20本、測線間隔は平均7mとなった。水深を平均1.5m とすると、水深の5倍の河床幅を計測でき、一般的なマルチ ビーム測深(水深の3倍程度)に比べて効率的であることを 再確認した。現地計測に要した時間は、潮位の低い時の作業 ができないといった制約もあり、準備・片付けを含めて9日間 であった。



図-1 計測範囲(左)および計測軌跡(右)

<sup>\*</sup> コンサルタント国内事業本部 流域・都市事業部 河川・水工部 \*\* コンサルタント国内事業本部 社会システム事業部 CIM推進センター

# 3. 観測データの処理および加工

## (1) 河床標高データの作成

計測時水位から測深データを差し引いて河床標高を算出し、 測線ごとに繋ぎ合わせ、1m<sup>2</sup>に1点の密度で、河床高の三 次元座標値データを作成した(図-2)。

湾曲部が連続している 7 ~ 10km 区間では横断方向に起 伏が見られる。一方、河道が直線的な 10~12km 区間では 横断方向の起伏が 7 ~ 10km に比較してあまり見られない。

# (2) 河床形状の可視化

標高分布図では河床の起伏や凹凸の形状を把握しにくいこ とから、この可視化の方策について試行を行った。

陰影図は、地形の形状を表現する際によく用いられるが、 片方からの光源を使用するため光源位置により影になる部分 が生じ、光源位置を変化させると見え方が変化し、起伏を網 羅的に把握できない。このため、傾斜図(起伏図)によって、 急崖部・平坦部を表現することとした。傾斜図の表現に際し、 地形図や陰影図の表現方法を参考に、傾斜がきつくなるほど 色が濃くなるように工夫した。さらに、高さ関係を可視化する ため、標高データより作成した DEM データに、作成した傾斜 図(ラスター)を貼りつけ、鳥瞰図とすることで、河床形状も 視認できるようにした。河床の凹凸が小さいことから、高さ方向 を3倍程度に強調することで、河床波スケールの凹凸も際立 つことが分かった。

作成した河床形状図を図-3に示す。橋脚周辺の洗掘、 水制工周辺の局所地形がはっきりと視認できる。また、河床 波形状として、うろこ状の模様と、縦断方向の筋状の模様の2 種類の河床の凹凸模様が確認された。

可視化処理の試行において、複数の関係者が実際に「見やすいかどうか」を判断できるよう、専門ソフトウェアがなくとも、また PC 環境によらず取扱いできるデータ型式が必要であった。これについては、GISソフト (QGIS)の Qgis2threejs プラグインを用いて、ウェブブラウザで確認できる WebGL 形式の3次元モデルを用い、任意の場所を様々なアングルで確認できるようにした。



<u>10km 付近より上流</u> 直線区間で河床は平坦 交互砂州が確認できる T.P.+0.5以上 +0.0-05 Ok -1.0 -1.5 -2.0 Ê -25 Ē Qk 愼 -3.0 10km 付近より下流 湾曲部が連続 -3.5 横断方向に複雑に 傾斜した地形 -4.0 -4.5 -5.0 T.P.-5.5未満 背景:管理基図平面図 (庄内川河川事務所提供)

図-2 河床の標高分布図



図-3 河床形状図

背景:航空写真(2012年撮影) (庄内川河川事務所提供)

# 4. 河川管理への活用に向けたケーススタディ

# (1) 洗掘等の変状の発見および状況把握

面的に漏れのない河床情報が得られると、洗掘などの変状 の発見に役立てられる。また、空間解像度、精度の高い計測 であれば、問題を発見しても、再計測することなく、すぐさま 任意地点の地形を把握できる利点がある。

今回の計測範囲には複数の橋梁が横過しており、橋脚周り では洗掘が生じていることが確認できた(図-3)。図-4の ように2本の橋脚における洗掘部の縦断地形を計測すると、 現在の洗掘深は、設計時に使用する最大洗掘深の実験式<sup>8)</sup> の半分程度であること、上流側勾配はほぼ実験式どおりである ことが分かった。さらに、知見の少ない縦断方向の洗掘延長 についても把握することができ、洗掘実態の把握において有 用であることを確認した。

# (2) 面的な地形変化の把握

面的な河床情報が複数時期で蓄積されると、差分をとること で、変動高の分布が把握でき、任意の領域における正確な変 動ボリュームが得られる。洪水前後の計測ができると、平面二 次元河床変動計算の検証材料として、精度向上に役立てるこ とも可能である。また、一時期のデータしかない場合でも、例 えば、管理河床高との比較により、問題箇所を漏れなく合理 的に抽出するといった活用も考えられる。

今回の計測範囲では、4年前から複数年度に渡って掘削 工事が行われているが、これらの工事の完成断面形状が縦断 20m ピッチで得られることから、掘削直後の地形はある程度面 的に把握できた。このため、計測値との差分をとり、掘削直後 から計測時点までの変化高を算出した(図-5)。その結果、 必ずしも全工区で堆積している訳ではなく、また堆積高にもば らつきが見られた。

次に、堆積を規定する要因分析を行ったところ、工区ごとの 掘削時期との関係性が見られ、掘削直後から約1年は堆積が 顕著であるが、その後は徐々に鈍化し、3年程度で一定値に 収束するという実態が把握できた。これより、堆積速度を把握 する上で、3年以上のモニタリングが必要であるという知見を 得ることができた。

#### (3) 中規模河床形態の把握

砂州に代表される中規模河床形態は、洪水時の水衝部の 形成や水位上昇に関連するため、治水上、その位置や高さ、 移動状況を把握することが重要である。一般的には空中写真 で砂州前縁線を読み取る場合が多いが、水深の大きい河川で は必ずしも容易ではない。面的な河床情報を活用することで、 水没している砂州の実態を把握でき、河道計画への反映と高 度化が期待できる。



図-5 C3Dによる計測河床高と掘削敷高の差分図







図-7 交互砂州の形成箇所(標高別に彩色)

庄内川下流域でも、図-6のように低水路は常時湛水して おり、これまで砂州全体の面的な実態は不明であったが、今 回計測において、10km付近より上流では、掘削を行ってき た箇所を含めて、図-7のように交互砂州が形成されている 状況を確認した。砂州の波長は120~250m程度、波高は 1m程度であるが、砂州形状はやや不明瞭であった。図-8 の枇杷島水位・流量観測所における流量時系列をみると、現 地計測を実施した2015年9月の直近の洪水は2014年9月 の450m<sup>3</sup>/s(年間に平均的に10時間程度発生する規模)で あり、近年大きな洪水は生じていない。このため砂州形状が 不鮮明になっていることが推察され、今後、比較的大きな洪 水後に計測することで、より明瞭な砂州地形が把握できるもの と期待される。

#### (4) 小規模河床形態の把握

砂河川では洪水規模によって小規模河床形態が変化し、これが河床粗度となって洪水疎通能力にも大きく影響を及ぼすことから、治水上、その実態把握が重要である。密な河床地形 データの処理方法を工夫すると、図-3のように河床の凹凸 模様が可視化され、小規模河床波の定量的な把握や分析に 役立てられると考えられる。

#### 1)砂堆スケールの計測

図-3 で示したうろこ状模様の範囲について、縦断図を作 成すると図-9のとおりである。地形の凹凸が規則的に並び、 そのスケールは波高( $\Delta$ )10~30cm、横断波長10~20m、 縦断波長( $\lambda$ )15~20mとなっていた。非対称な縦断形状 からは、砂堆であることが推察された。

# 2) 水理量との比較による同定

次に、砂堆かどうかの同定のため水理量との比較を行った。 一次元不等流計算を用い、200mピッチ横断データを地形条件とし、直近洪水ピーク時の下流端水位と上流端流量を与えることで全体的な流況把握を行った。

芦田ら<sup>9)</sup>は砂堆のスケールλ、Δを水深 H で無次元化し て示し、砂漣のそれとは大きく異なることを示している。今回計 測したうろこ状模様のスケールは、このうち砂堆の範囲におさ まった。

山本<sup>10</sup>は、相対水深 H/dと無次元掃流力 τ\* を評価軸と して小規模河床波の形成領域図を作成している。図-10のと おり今回の計測箇所における水理量を流量規模別にプロットす ると、うろこ状模様が確認された範囲では、直近洪水で砂堆 領域となる。また、これより流量規模が小さい場合や、縦筋模 様が確認された箇所では砂連領域となっている。なお、今回 の検討領域は、実験領域ではなく、現地河川の資料分析や 外挿による領域のプロットにあたり、貴重な実態データであると もいえる。

以上の2つの既往知見との比較を踏まえ、うろこ状模様は 砂堆であると同定した。





###★素 #/4 図ー10 小規模河床波領域区分(d=0.05cm)のプロット



#### 3) 粗度係数の把握に向けた活用事例

吉川・石川<sup>11)</sup>は、河床波の形状特性と水流の抵抗との関 係性を理論的に整理している。同関係式を用いることで、砂 堆のスケールλ、Δから、水深 H に応じた粗度係数を図ー 11 のように推定できる。既往洪水で検討された逆算粗度と比 較したところ、洪水規模によっては形状抵抗の生じないフラット ベッドが形成されている状況が把握でき、その移行する目安と しては 2,000m<sup>3</sup>/s 程度ではないかと推定された。このような知 見は、解析精度の向上や河川管理の高度化に役立てられると 考えられる。

#### 4) 砂堆の形成時期の推測

ここまでの検討は、砂堆が1年前の直近洪水によって形成 されたことを前提に進めているが、庄内川下流域は感潮域で あり、潮位変動に応じて順流・逆流の流れが常に生じる場所 であるため、砂堆がそのままの形状で維持されていたことにつ いての考察を加え、砂堆スケールと比較する水理量の妥当性 を参考までに確認した。

一次元不定流解析を用い、200m ピッチ横断データを地 形条件とし、下流端水位は実績の潮位変動(720時間)を、 上流端流量は平水流量の一定通水とし、平水時に潮位変動 によって生じる水理量分布を推定した。計算結果を図-12に 示す。流量および摩擦速度は、潮位変動に伴って順流方向 にも逆流方向にも働くが、河口に近いほど大きく、上流に行く ほど小さくなり順流方向に卓越する傾向となる。砂堆が確認さ れた 10km 付近でも、順流・逆流の交互の流れが生じるもの の、代表粒径 0.6mm (図-13)の移動限界を上回るような 摩擦速度は生じない。このことから、直近洪水によって形成さ れた砂堆が、1 年近く経ってもそのまま残っていることは水理 的にも説明がつくと判断した。

#### 5) 縦筋状模様に関する検討

最後に、図-3 で確認された縦筋状模様については、参 考となる知見もなく不可解であったが、横断方向に傾斜した箇 所に限って見られることが分かり、図-14 のとおり、縦筋模様 の形状が計測時の航跡とほぼ一致することから、測線間の繋 ぎ目に生じる計測誤差が表現されたものと同定した。傾斜地に おいてこのような段差が表現された理由は、図-15 のとおり、 データ処理上の問題を含んでおり、現地観測結果を用いる上 で、計測誤差を踏まえる重要性を再認識した。

# (5) さらなる活用に向けて:河床の質的状況の把握

河床の地形計測にあわせてサイドスキャン画像が得られる が、ここから、大まかにではあるが礫・砂・泥の区分や、根 固ブロックなどの構造物の状況を読み取ることができる。また、 塩見・鈴木・山本ら<sup>12)</sup>は、同じく計測で得られる反射強度を 別途解析することで、河床表層の質的状況を推測する試みを 行っている。





図-12 潮位変動に伴う水理量履歴の推定 (上:流量、下:摩擦速度)



図-13 砂堆の形成されている箇所の河床材料粒度分布



図-14 河床形状と計測時航跡との重ね合わせ



# 5. 活用にあたっての留意事項

#### (1) 空間分解能

今回計測(1mに1点の標高点)は、定期横断測量(縦 断間隔200m、横断間隔5mの空間密度)に比べると、単位 面積あたりの情報量が単純に1,000倍となる。ALB測深(高 度や現地条件にもよるが1~5mに1点)の場合には、定 期横断測量の数10倍の情報量である。一般には分解能が高 いほど高コストとなることから、面的計測にあたっては、把握し たい事象の平面スケールに応じて空間分解能を定め、その要 求性能を満たすよう適切な計測手法を選定することが重要であ る。図-16に示すように、例えば、局所洗掘等の変状や中 規模河床形態の把握であれば5~10mの分解能が必要で ALB測深等が望ましいが、大まかな土量変化の把握であれ ば10~20m精度でよいため横断測量等で対応できる。小規 模河床波(砂堆)の把握を行う場合は、粒径にもよるが1~ 5mの分解能が目安となり、本調査のような詳細な地形計測が 必要となる。

# (2) 計測精度

今回計測では、別途、音響測深機による横断測量を10測 線で行い、推定精度が1cm以内に収まることを確認した上で 用いた。特に、新技術を用いる際は、別の計測手法による精 度検証を行い、結果の信頼性を担保することは重要である。

また、今回計測結果では、本来は平坦と思われる傾斜地上 に、一定周期で数 cm の段差地形が縦筋状に残る結果となり、 計測原理や計測仕様、データ処理手法によって生じる計測誤 差があることを把握した。このような計測誤差の存在により、高 さ数 10 cm の砂堆は明瞭に視認できたが、それより小さいであ ろう数 cm の砂連を視認することはできなかった。なお、計測 範囲の下流側 7 ~ 10 km は、水理条件上は砂漣形成領域で ある。

以上を踏まえると、計測手法を選定する際には、把握した い事象の鉛直スケールが、計測精度に対して数倍以上あるこ とを確認することが重要である。

# (3) 計測コスト

計測手法の選定においてはコストが制約となる場合も多い。 今回計測と同様のスワス測深と、一般的な定期横断測量のコ ストを比較した事例<sup>13)</sup>によると、スワス式の方が2.3倍のコスト 増となる。ただし、この比較は両者の空間密度に1,000倍の 差異がある中での比較であるため、横断測量を密に行うと仮定 して試算すると、**表-1**のとおり、50mピッチより密な横断測 量を行う場合には、スワス式の方がコストの面でも得られる情 報量の面でも有利となることが確認できる。



表-1 測量ピッチとコスト・情報量の試算

横断測量の	C3D/横断測量	C3D/横断測量
縦断ピッチ	コスト比	情報量比
200m	2.3	1,000
100m	1.2	500
50m	0.6	250
20m	0.3	100

#### (4) 適用範囲

本稿は水中の河床把握を取り扱ったものであるが、どのよう な現地にも適用できるものではなく、調査目的や現地条件に 応じた適切な調査手法の選定が重要となる。

#### 1) 水深との関係性

今回計測では、計測機器を有人ボートに搭載するため、喫 水深として50~70cmが必要であった。このため、水面から 50~70cmの範囲は計測できず、例えば、水面に近い河岸 や平瀬等の浅場は把握できない。今回計測では、計測場所 が感潮域である特性を活かし、河岸付近の浅い場所は大潮の 満潮時をねらって調査する等により、極力、広い範囲を計測 できるよう工夫した。なお、本計測機器(C3D)の場合、水 深数10mまでは計測できるため、国内河川において、水深 の上限に関する制約はない。

このように、河川水位の変化や計測機器の特性を総合的に 判断して目的に適った計測計画を立てることが肝要である。

なお、適用事例のまだ少ない新技術であるが、今回計測機 器を無人ボートに搭載することも可能となっており、この場合、 喫水深は 30 ~ 50cm まで抑えることができる。ただし、遠隔 操作となるため、やや作業効率は劣る。

複数の手法を組み合わせるものとして、満潮時に水深計測 を行い、干潮時には陸部から MMS や地上レーザ計測、ある いは UAV 写真測量等による計測を行うことで、両者を組み合わせて漏れなく地形を把握することが可能である。この場合、 ラップ点を設けて、適切に合成するような工夫が必要である。

近年は、ALB 測深に際し、近赤外線レーザ計測も同時に 行うことで、1回の計測でシームレス地形を得られる技術も実 用化されている<sup>1),2)</sup>。また、UAV 写真測量においても、従来 は陸部のみが対象であったが、水中の屈折率の補正や水中 ターゲットの設置等により、水深数 m 程度は地形計測が可能 であることが報告されている<sup>5),6)</sup>。このような近年の計測手法 は、非接触で場を乱さずに調査でき、かつ、従来の測深技術 が不得手としていた浅場の計測ができるため、今後の実用化 の拡充が期待される。なお、留意点として、ALB 測深や水中 のUAV 写真測量の場合は、計測可能な水深に上限値があり、 現在は濁り等にもよるが、水深にして数 m が限界とされる。

# 2) 植生との関係性

今回の計測現場では、沈水植生が密生するような場所はな く、フィルタリングに苦慮する箇所は少なかったが、一般に、 河床上に植生や立木、ゴミ等が覆っている場合には、河床ま で透過して到達する点数を多く得るため、密な計測点数が必 要となる。

# 3) 流速との関係性

今回の計測現場は、平常時の流速が1m/s未満であり、ボートが上下流に航行することに問題はなかったが、流速が2m/sを超える場合には、ボートによる遡上が難しく、往復できないため調査が非効率となり、また安全上の問題も生じる。このような現場では、ALB測深やUAV写真測量など、非接触による計測が望ましい。

#### 4) 水質や流れ等との関係性

上記のような水深、植生影響、流速等の現地条件に加え、 濁り(透視度)や塩分濃度といった水質条件、気泡の状況といっ た流れの条件についても、調査の精度を左右する場合がある ため、事前に留意しておく必要がある。

# 5) その他の現地条件との関係性

ボートによる計測の場合、床固工や沈水橋など、ボートの往 来を遮るものがないか、坂路等の進入路、係留場所や駐車ス ペースがあるか、港湾区域や水上レジャーエリア、漁場、公 園など配慮が必要な場所かどうかについても事前の調査が必 要である。

UAV による計測の場合には、近傍の飛行場、周辺の DID 地区、橋梁の位置、河川利用状況等を把握した上でのフライ ト計画や安全計画を立てる必要がある。

## 6. おわりに

近年の計測技術の躍進ぶりは目覚ましいが、一方で、河川 管理の実務にはなかなか取り込みが進んでいない。この理由 として、「何ができるのかが具体的にイメージできない」「コス ト増が心配」という実態があるものと考え、本報において、水 中の河床面的情報を河川管理に活用する上での具体例を示した。また、調査および検討を通して得た留意事項や計測コスト、適用範囲についても極力具体的に整理した。

本報が計測技術と管理技術の間を繋ぐ一助となり、今後の 河川管理の高度化・省力化に寄与することを祈念する。

謝辞:調査結果の考察に関して、名古屋工業大学の冨永晃宏 教授、河川財団の山本晃一所長には、丁寧に指導を賜りまし た。庄内川河川事務所の方々には、データ提供等の面で多大 な協力をいただきました。(株)アーク・ジオ・サポートの方々 には現地観測において尽力いただきました。ここに記して謝意 を表します。

# 参考文献

- 山本一浩ほか: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、2017
- 岡部貴之、坂下裕明ほか: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、2014
- 掛波優作、神野有生、赤松良久ほか:UAV-SfM 手法を用いた高解像度かつ簡便な河道測量技術の検証、河川技術論文集、第22巻、2016
- 原田守啓ほか: UAVと水域可視化処理による河川地形計測手 法の検討、河川技術論文集、第22巻、2016
- 5) 齋藤正徳ほか: UAV 写真測量による簡易な河川地形把握手法 を活用した河道管理の検討、河川技術論文集、第23巻、2017
- 神野有生ほか: UAVとSfM-MVSを用いた河道水面下測量技 術における水面屈折補正の高度化、河川技術論文集、第23巻、 2017
- 7) 秋田麗子ほか:水中の河床地形の面的計測とその活用方策について、河川技術論文集、第23巻、2017
- 8) 治水上から見た橋脚問題、土木研究所資料 第 3225 号、pp.33-37、1995
- 9) 芦田、江頭、中川ほか:21世紀の河川学、京都大学学術出版会、p.114
- 10) 山本晃一:沖積河川、技報堂出版、p.27
- 11) 吉川秀夫、石川忠晴:砂漣・砂堆上の流れの抵抗について、 土木学会論文報告集、第281号、1979
- 12)塩見真矢、鈴木克尚、山本晃一ほか:3次元サイドスキャンソナー を用いた鬼怒川下流部における泥岩・沖積粘性土層露出河床の 侵食特性の検討、河川技術論文集、第22巻、2016
- 13) 坂角淳一、保坂裕:信濃川下流域のスワス測深計測について、 北陸地方整備局、2012
- 14) 河床形状小委員会:移動床流れにおける河床形態と粗度、土木 学会論文報告集、第210号、1973