河川技術論文集，第23巻，2017年6月

水中の河床地形の面的計測と その活用方策について

UTILIZATION OF RIVERBED SURFACE MEASUREMENT DATA FOR RIVER MANAGEMENT

秋田　麗子[1]・西口　亮太[1]・野間口　芳希[1]
Reiko Akita, Ryota Nishiguchi and Yoshiki Nomaguchi

[1] 正会員　日本工営株式会社　河川・水工部（〒102-8539 東京都千代田区九段北 1 丁目 14 番 6 号）

Conventionally, the riverbed topography has been measured for each cross-section by 200m pitch. In recently years, according 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 reviewed specific examples of strategies and general considerations to utilize surface measurement data of the riverbed topography for the river management.As a specific example, we analyze the result of riverbed topography by swath-type sounder at the downstream of Shonai River. The case study of ditection and monitoring of the deformation, grasping the amount of change from the temporal variation of the measurement, grasping the bars and dunes. As a matter of consideration, we complied the spatial resolution and measurement cost.

Key Words : *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測量[1)]や写真画像を用いたSfM技術[2)3)]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は，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，本報において活用事例に関してケーススタディを行った結果を示す．

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，ブロック毎に，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．

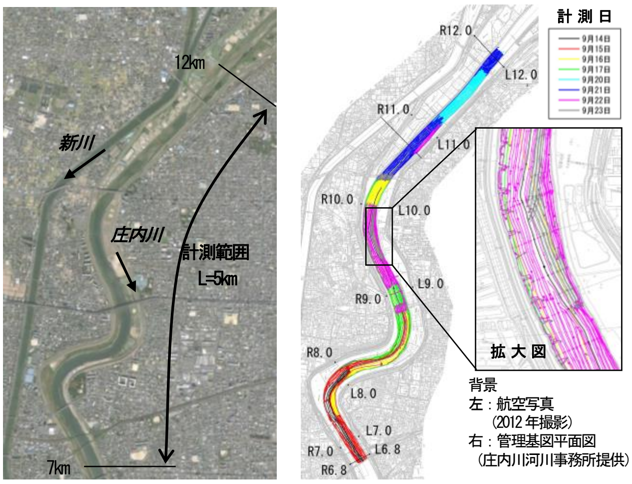


図-1　計測範囲（左）及び計測軌跡（右）

3.　観測データの処理及び加工

(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，1m²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。

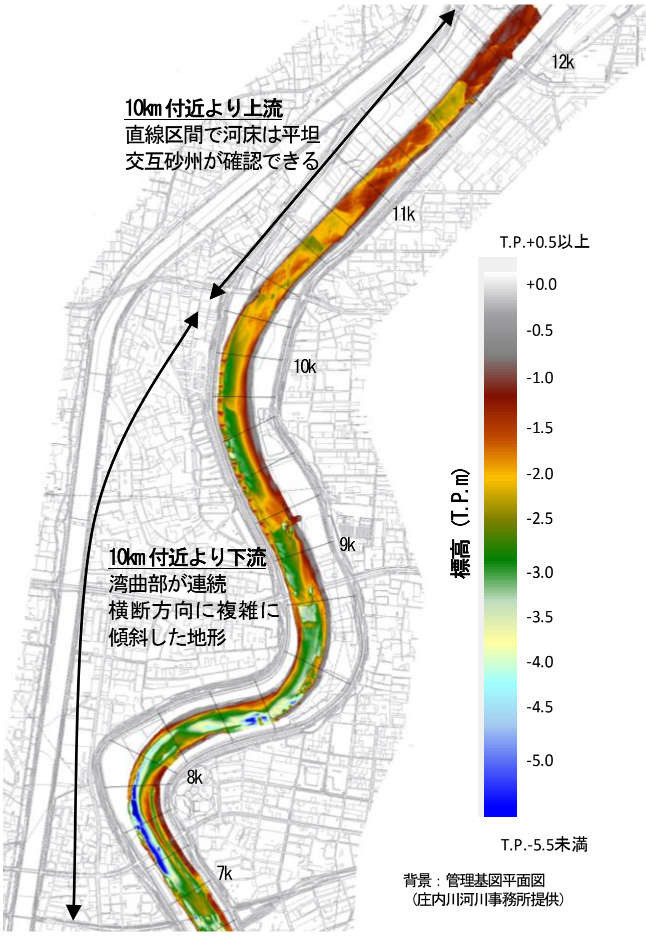
(2)　河床形状の可視化

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するため，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．

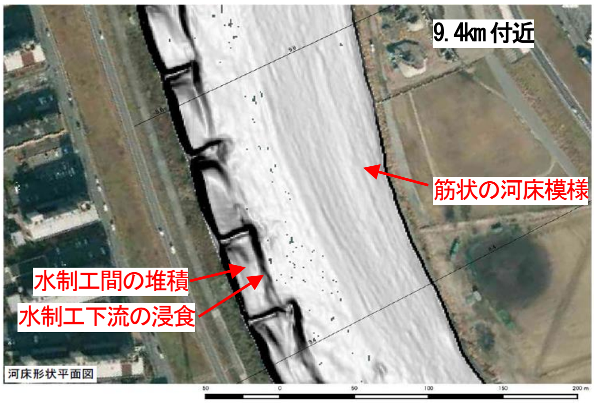
作成した河床形状図を**図-3**に示す．橋脚周辺の洗掘，水制工周辺の局所地形がはっきりと視認できる．また，河床波形状として，うろこ状の模様と，縦断方向の筋状の模様の2種類の河床の凹凸模様が確認された．

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。



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



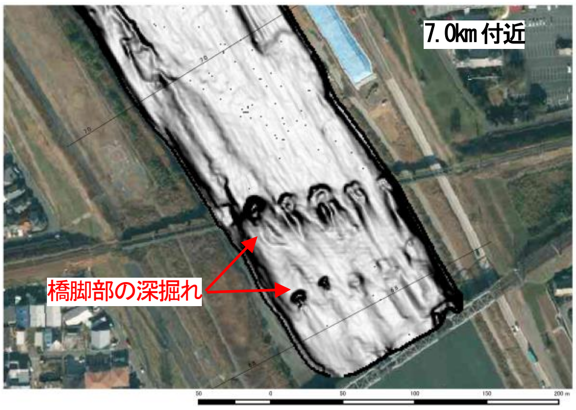


図-3　河床形状図

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，精度の高い計測では，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という利点がある．

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，設計時に使用する洗掘深の実験式[4]と比較して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，工区毎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．

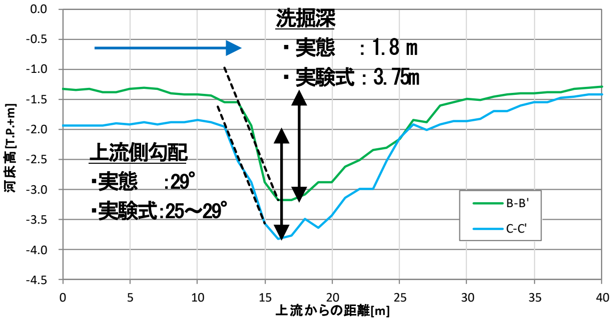


図-4 A橋の橋脚（2基）の洗掘部の縦断図

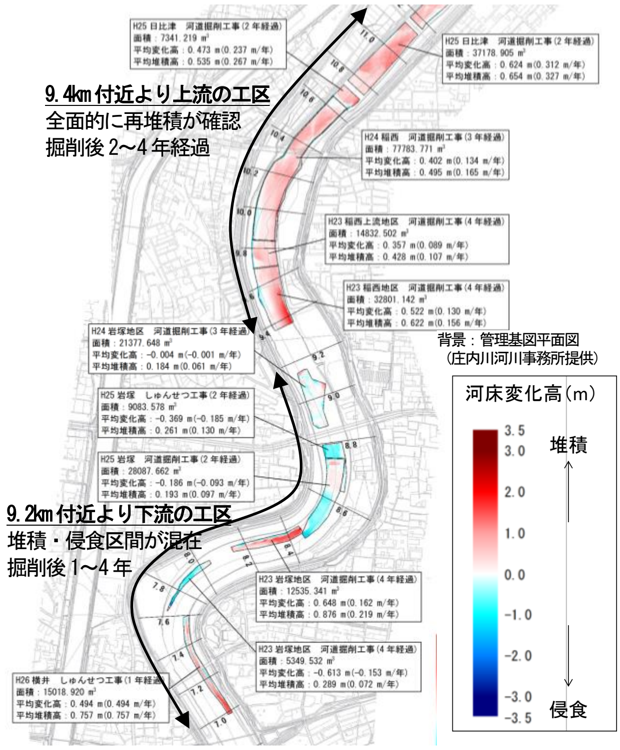


図-5 C3Dによる計測河床高と掘削敷高の差分図

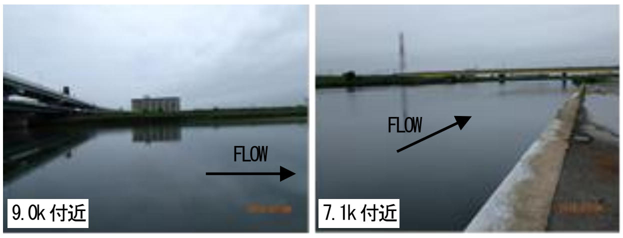


図-6 平常時の現地状況

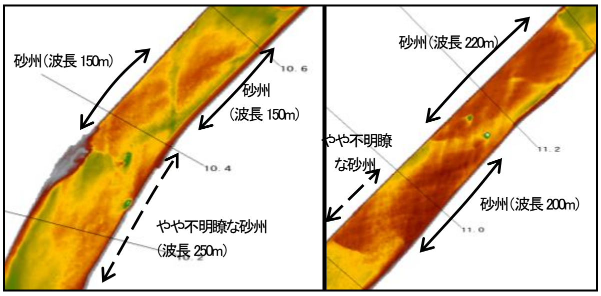


図-7 交互砂州の形成箇所（標高別に彩色）

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$450m^3/s$（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．

a) 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（Δ）10～30cm，横断波長10～20m，縦断波長（λ）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．

b) 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[6]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[5]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漣領域となっている．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．

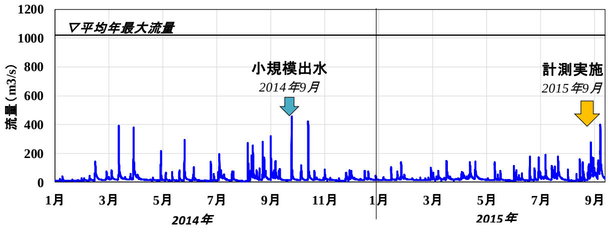


図-8　枇杷島観測所の流量時系列（2014～2015年）

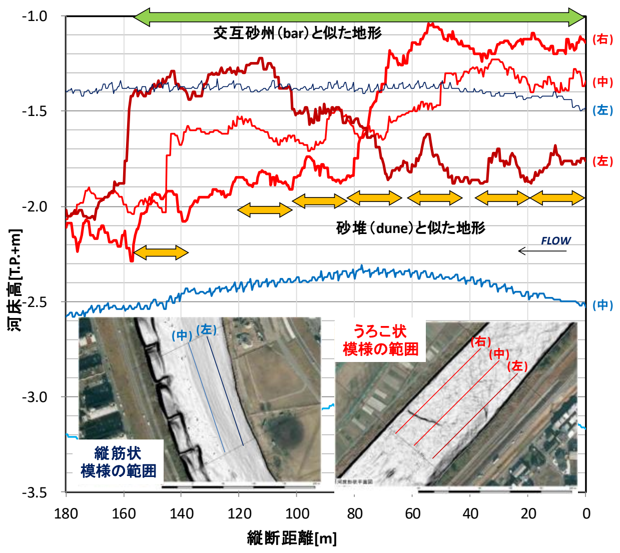


図-9　小規模河床波の縦断図

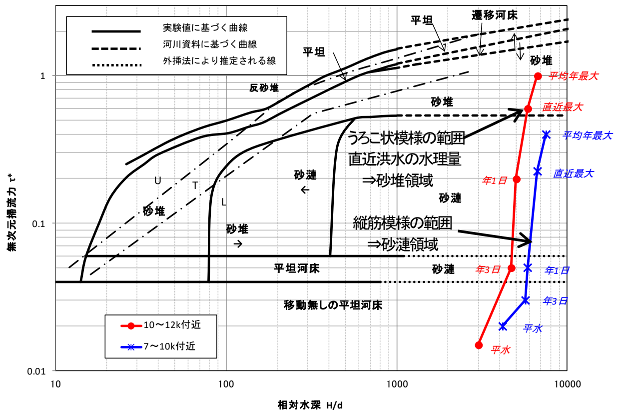


図-10　小規模河床波領域区分（d=0.05cm）のプロット

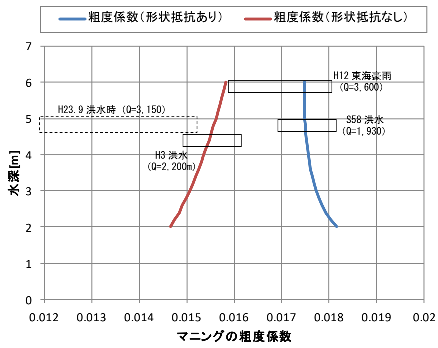


図-11　砂堆のスケールからの粗度係数の推定

c) 粗度係数の把握に向けた活用事例

吉川・石川[7]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-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^3/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．

d) 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-13**に示す．

潮位変動に伴って，流量および摩擦速度は河口に近いほど大きく，順流方向にも逆流方向にも働くが，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．

e) 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[8]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

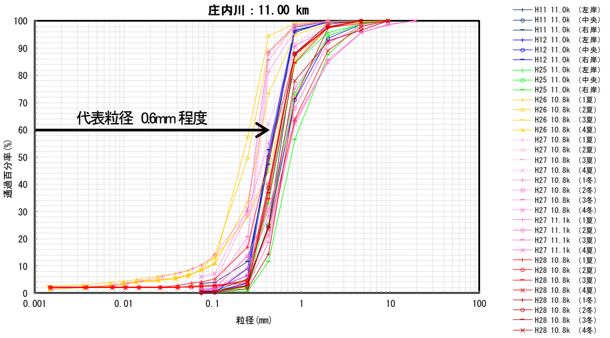


図-12　砂堆の形成されている箇所の河床材料粒度分布

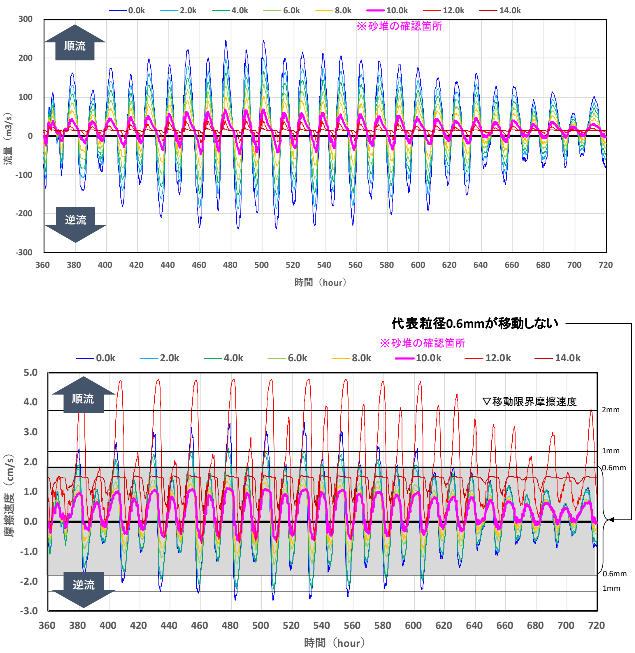


図-13　潮位変動に伴う水理量履歴の推定
（上：流量，下：摩擦速度）

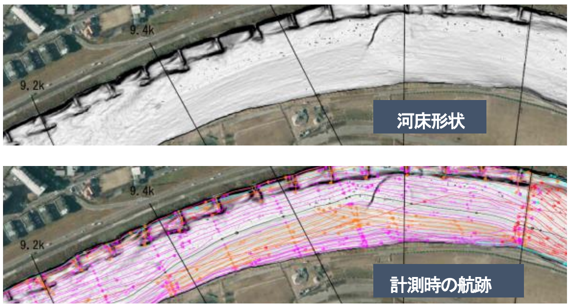


図-14　河床形状と計測時航跡との重ね合わせ

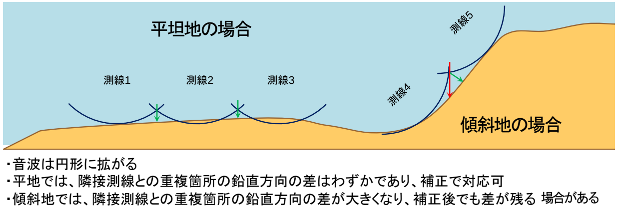


図-15　傾斜地におけるデータ処理上の誤差（模式図）

質的状況を推測する試みを行っている．

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測量（高度や現地条件にもよるが5～10mに1点）の場合には，定期横断測量の10～40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，局所洗掘等の変状の把握であれば5～10m精度が必要でALB測量等が望ましいが，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．

いずれの場合にも，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の確認が重要である．

(2) 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[9]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

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

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，「何が出来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，検討を通して得た留意事項や計測コストについても整理した．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．

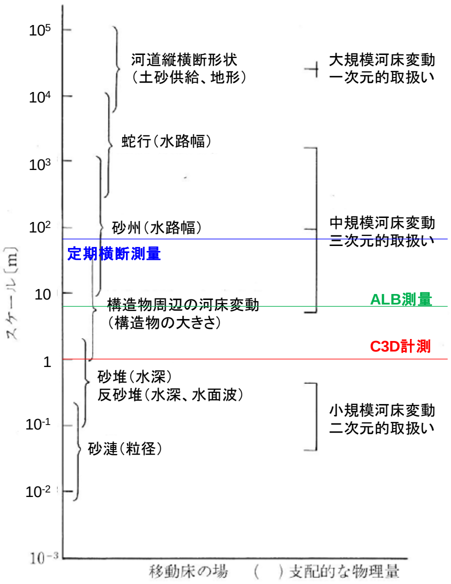


図-16 河床変動のスケール[10] に加筆

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．ここ記して謝意を表します．

参考文献

1) 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
2) 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
3) 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
4) 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
5) 山本晃一：沖積河川，技報堂出版，pp.27
6) 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
7) 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
8) 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
9) 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
10) 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

（2017. 4. 3 受付）