

実河川における流砂の水理とその計測技術

萬矢敦啓・小関博司・山本 晶

1. はじめに

流砂の水理学に関連する基本的な考え方は、1960年から1980年代にかけて実験水路を通して現象が解明され、モデル化されてきた。これらの知見はすでに教科書的な知見でもあると同時に、例えば現在でも平面二次元河床変動計算などに実装され、河道の設計等に使用されている。

一方、近年の新技术を用いた観測手法の発達は目覚ましい。特に音波、電波に関わらず波の分析技術の貢献が大きい。例えばドップラー効果を用いた流速の計測、波の減衰量を活用した濃度計測、照射距離の計測等、活用事例は枚挙にいとまがない。議論から少し外れるが気象レーダもこれにあたる。分析技術以外にも波の操作に関連する、例えばフェーズドアレイ技術も大きな貢献をしている。河川技術者がこのような技術の進展により大きな恩恵を受けるものに、河床高の時間変化、流速分布の三次元計測、ウォッシュロードや浮遊砂等の微細砂の時空間分布、河床の面的な計測が挙げられる。このような技術を活用することで「あたかも実験水路で実験をしているかのように実河川から情報を得られるようになる」ことが著者らの主張であり、これまでも検討を進めてきた。またこのような技術は河床変動計算の検証や河道内の土砂通過量を検討するための技術となることが期待される。

本稿ではこれまで水文チームが執筆してきた複数の論文を中心に国内外の論文をレビューする形式で、最新技術を用いた流砂の水理に関する検討の一例を紹介する。

2. 流砂の水理の概要

図-1は小規模河床波が起きているときの河道の断面を模式的に示したものである¹⁾。図の茶色線は河床高を示し、ここでは小規模河床波でいうと

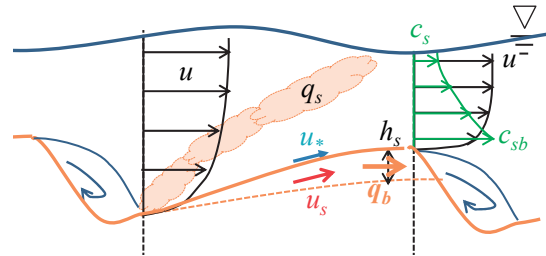


図-1 河床波一波長内にある土砂輸送形態

u : 河川水の流速、 q_b : 掃流砂量、 u^* : 摩擦速度、 u_s : 掃流砂の流速、 h_s : 掃流層厚、 c_s : 微細砂濃度、 c_{sb} : 微細砂の河床近傍濃度、 q_s : ボイルにより浮遊した微細砂

ころのDuneを模している。青線がそれに対応する水面形でこれは河床波とは逆位相であり、河床波の凸部の位置で水面は凹んでいる。

水面と河床の間を流れる流水は河床波の凸部の部分で最も速くなり、その後河床波の凹部にかけて急激に広がる。この急拡部の凸部近傍では流線が剥離し、凹部を少し過ぎたあたりで再付着する。凹部では逆向きの流れが発生することもある。このように流水は河床波の形状の影響を受け、それぞれの場所において異なる流速分布を持つことになる。河床波の波高が大きくなると、凹部内の渦も大きくなり、それによりエネルギーの消費が大きくなる。このように消費されたエネルギーが河床粗度となり、形状抵抗として評価される。

流水の流速分布の違いが河床に働く外力（掃流力又は掃流力を速度に換算した摩擦速度： u^* ）に変化を与える。この外力は凹部でほぼゼロとなり、再付着点から徐々に大きくなり、凸部で最大となる。この外力により砂の流れ（流砂）が掃流状態となり、これらは厚さを h_s （掃流層厚：掃流状態で動く流砂の厚さ）、流速を u_s 、さらに濃度を考慮して掃流砂量 q_b として換算される。掃流砂量は掃流力の増加関数であり、凸部で最大となる。

微細砂は掃流力により巻き上がるものと、流れの不安定性により気象現象でいう竜巻のような現象として巻き上がるものがある。前者は一般的には掃流力で巻き上がる微細砂で、芦田・道上によ

る基準面濃度の関係やラウス分布で説明でき、後者はボイル現象として観察されている。このように小規模河床波の一波長内部で起きている現象は河川工学の一つである流砂の水理学として扱われているクラシックな話題であり、掃流砂、浮遊砂、河床波、流水抵抗等で分類できる。

3. 計測により得られた流砂の水理

3.1 掃流砂量

日本国における河川の多くは掃流砂卓越河川であり、河道を理解する上で最も重要な土砂輸送形態の一つである。これまでの計測手法は大きな塵取りのような採砂器を一定時間川底に沈め、流砂の量と粒度分布を計測してきた。これらの結果は同じ水理量であったとしても1~2オーダー異なる結果も散見されている。

音響測深器の代表的な一つであるADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)は海洋技術として開発されたものであるが、河川計測に適用されて久しい。流量観測という観点から国内外で観測事例が多く報告されているが、流砂観測という観点でも他の技術にはない利点がある。それはボトムトラック機能(ADCP本体の移動速度を計測する機能)を用いた掃流層表面の掃流砂速度の計測である。この考え方を掃流砂観測に最初に適用したのはRennie (2002)である²⁾。その後、萬矢ら(2010)が実河川での計測結果を基に鉛直方向の流速分布から摩擦速度 u_* を算定するアルゴリズムを開発した³⁾。本手法は、ボトムトラック機能で u_s を計測し、算定した u_* から h_s を算出し、両者を掛け合わせて流砂量を求めるものである。

国内外でボトムトラック機能が算定するものの意味に対する考察が報告されているが、それを決定付ける直接的な検討は上原ら(2018)である。ここではボトムトラックにより計測された掃流砂速度と実験水路側面から撮影した映像から算定した河床近傍の流砂の速度を比較し、これらが概ね正しいことを示した⁴⁾。小関ら(2017)は北海道開発局が実施している大規模実験施設(千代田実験水路)において同手法の改良と検証に成功した⁵⁾。ここでは沈砂池を掘り、沈砂池内に堆砂する量をマルチナロービームソナーで計測すると共に、流入土砂をADCPで観測し、両者は等しいことを確認した。小関らの改良は u_s から u_* を算出するもの

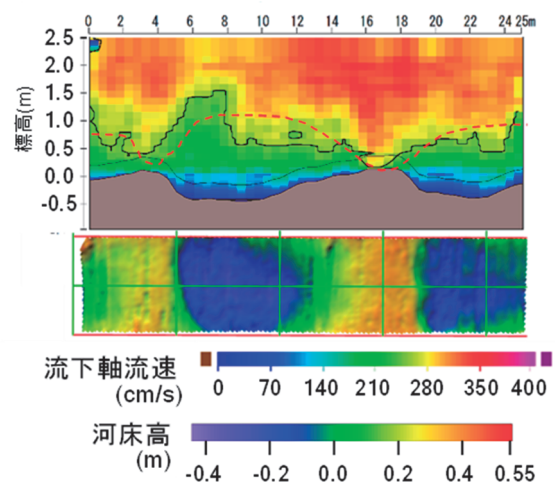


図-2 得られた観測結果の一例⁶⁾

(上図: ADCPで計測した流速値で河道中央の断面図、
下図: マルチビームソナーにより計測した河床の平面図)

で、これは江頭らの式¹⁾を適用している。

掃流砂量を把握するために一般的な手法は、河床波の計測により得られる。例えば橘田ら(2017)はマルチビームソナー(音響測深器の一つで扇形に計測する観測機器)、ADCP、GNSS(Global Navigation Satellite System)を搭載した観測船を用いて計測した結果を報告している⁶⁾。具体的には、小規模河床波の波長及び波高、その時間変化を丁寧に観測することで得られる。例えば図-2は千代田実験水路で得られた結果の一つである。ここでは波長10m程度の河床波が計測されていることがわかる。ここでは約2分に一度の観測が実施され、このような結果から画像を動画としてみると、あたかも波が動いている様子わかる。尚、図-3b)は図-2の下図の中央に線を設け、その線上における標高値を横軸に線としてプロットして、順次、異なる時間の結果を縦方向にプロットしたものである。一方で図-3a)はGNSSが計測した水面形状を用いて図-3b)と同様の図を作成したものである。図-3a)b)に斜め線を示すが、この勾配が河床波の移動速度である。両者は明確さに違いはあるものの、ほぼ同様の速度を持つ。また計測の前半部と後半部で速度に若干の違いがあることが特徴的である。前述の図-1で示したように河床波が存在すれば条件によっては水面波も存在することになる。また河床波が動けば水面波も動くことになるが、図-3はこのような現象を明確に示したものである。

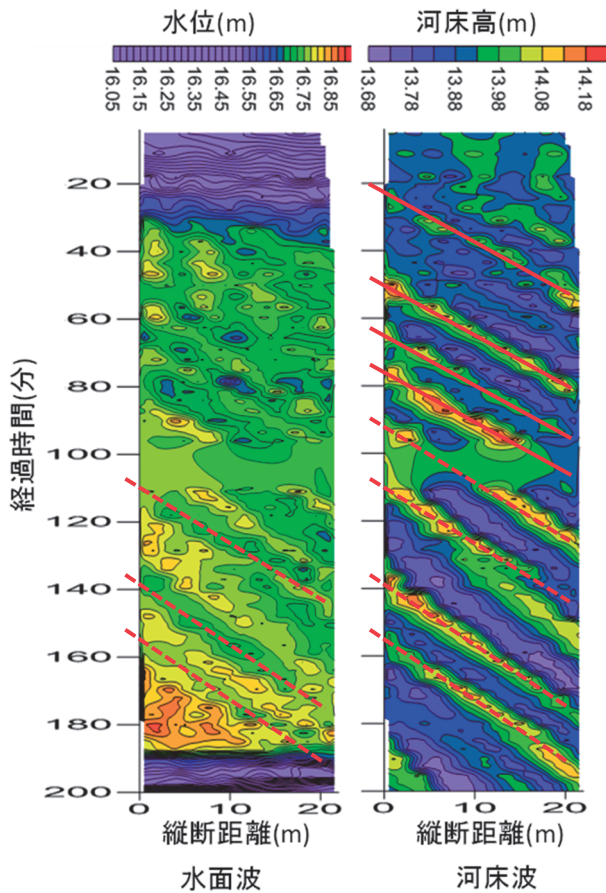
図-3 a) 水面波及びb) 河床波の時空間図⁶⁾

図-4はADCPで計測した流砂量 q_{bA} と河床波の移動速度から算定した流砂量 q_{bM} の時間変化を示したものである⁷⁾。実験で設定した水位は計測時間開始後30分から190分の間に变化してないことから、この間の平均的な掃流力も同様に变化していない。しかしながら q_{bM} は時間的に大きく変動している。他方 q_{bA} はそれほどの時間変化がない。例えば125分あたりの時間変化をみると、大きく

变化する q_{bM} の間を取るように q_{bA} がある。著者らは q_{bA} が q_{bM} より合理的であると考えている。

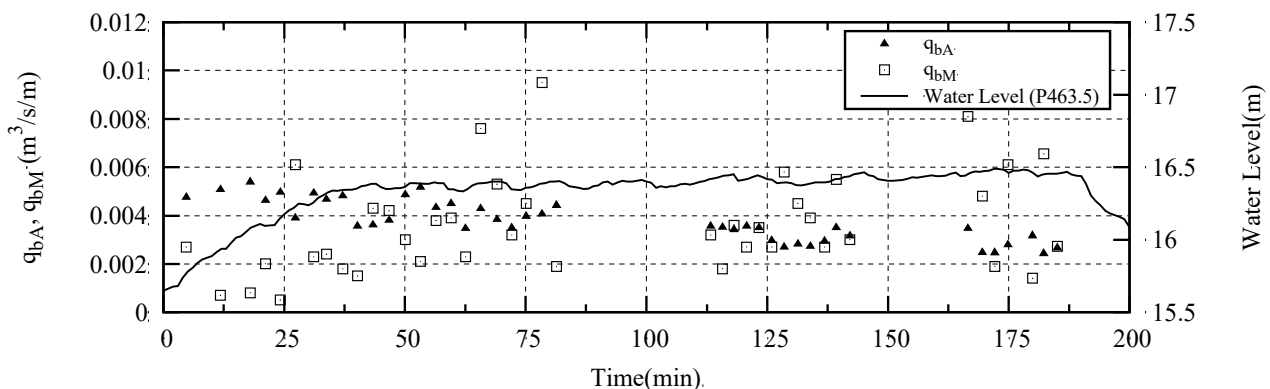
3.2 微細砂量

ADCPが計測する項目の一つに反射強度がある。これはADCPが発出した音波の減衰量から濁度分布を算定するものである。複数の手法があるようであるが橘田らにより開発された手法がある⁸⁾。この手法はその後日本でも使用実績が高く、橘田らは設置型のADCPを用いて一年を通した浮遊砂のフラックスを算定している⁹⁾。一方でOkada et al(2016)はバングラディッシュ国ブラマプトラ川で流量、掃流砂、浮遊砂を同時に観測した。ここでは川幅5kmの河道において、62,766 m³/sの流量、1.28 m³/sの掃流砂量、16.51 m³/sの浮遊砂量であることを示した¹⁰⁾。またGul et al (2018)はADCPによる面的な計測を実施し、河床波による凹凸が存在する領域と平坦河床における微細砂の濃度の面的な分布を比較した。図-5Bの●は有人船から観察したボイルの発生位置である。図のコンターの暖色系の色と●の位置が概ね一致していることがわかる¹¹⁾。すなわち河床の凹凸が鉛直方向の流速やボイルの発生を引き起こし、高濃度の微細砂を発生させている。この現象は例えば平面二次元河床変動計算には実装されていない部分である。

4. まとめ

本報では、河川における流砂の水理の概要を述べ、最新技術による掃流砂速度、掃流砂量、河床高、および浮遊砂量の測定例を紹介した。

流砂の水理の概要では流水抵抗、掃流砂、微細砂の挙動がそれぞれ密接に関連していることを述べた。最新技術による測定例では最新の観測技術

図-4 ADCPで計測した流砂量 q_{bA} (単位幅当りの量)と河床波の移動速度から換算した流砂量 q_{bM} の時間変化⁷⁾

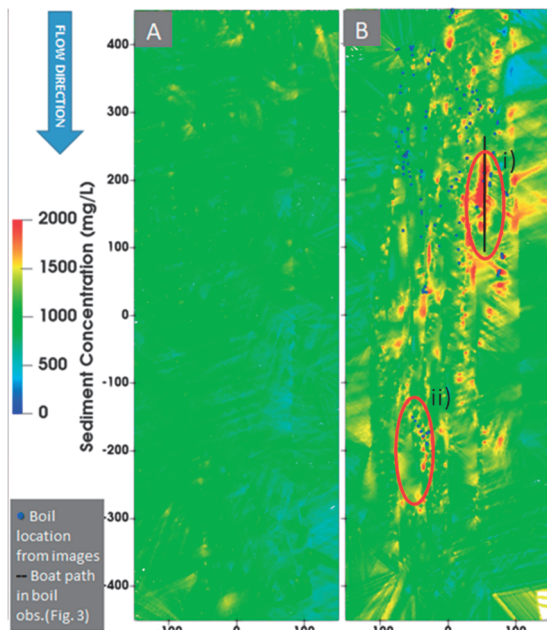


図-5 平坦河床(A)及び河床波(B)が発生する領域における微細砂の平面分布¹⁰⁾

による測定結果と現在ADCPによる鉛直方向と流下方向の二次元の流速分布、マルチビームソナーによる河床高、およびGNSSによる水面高の測定結果とこれらの測定結果に基づいた流砂量の解析結果、ならびにADCPによる浮遊砂の平面分布の測定結果を紹介した。

掃流砂量の測定結果は、従来の流砂の水理に関する知見を検証するものであり、複数の方法が整合することも確認できるものであった。一方、微細砂の濃度や高濃度の発生位置は既往の二次元河床変動では説明できないことが明らかになった。

日本国内の多くの河川は全域にわたり流砂系であり、河川管理等を実施するにあたり流砂を考慮することが合理的である。しかしながら洪水時の河床変動や流砂量の実態を把握することは難しいとされてきた。本報で概説したように近年の観測技術の進化により得られた計測結果は流砂の水理

の観点からも合理性を担保できるようになってきており、河川管理への適用が進むよう引き続き検討して参りたい。

参考文献

- 1) 例えば芦田和男、江頭進治、中川一：21世紀の河川工学、京都大学学術出版会、2008
- 2) Rennie, C. D., et al.: Measurement of bed load velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, J. Hyd. Eng., Vol. 128, No.5, 2002
- 3) 萬矢敦啓ら：ADCPを用いた摩擦速度と掃流砂量の算定手法、水工学論文集、第54巻、pp.1093～1098、2010
- 4) 上原有稀ら：ADCPで計測したボトムトラック速度を用いた掃流砂量算定手法に関する実験的研究、土木学会論文集B1(水工学) Vol.74、No.5、pp.I_631～I_636、2018
- 5) 小関博司ら：実河川における掃流砂量と有効摩擦速度の評価方法、土木学会論文集B1 (水工学)、Vol.73、No.4、pp. I_763-I_768、2017
- 6) 橋田隆史ら：流況河床高同時観測システムの構築と観測から得られた河床波の挙動、土木学会論文集B1 (水工学)、Vol.73、No.4、pp.I_535～I_540、2017
- 7) Hiroshi Koseki et al.: Measurement of shear velocity and bed load discharge, 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, FP31, pp.1-8, 2017
- 8) 橋田隆史ら：ADCPを応用した河川土砂フラックスのモニタリング手法の研究(Ⅰ)、第41回環境工学研究フォーラム講演集、2004
- 9) 橋田隆史ら：ADCPの超音波反射強度を利用した濁度計測技術について、河川流量観測の新時代第二巻、pp.49～56、2011
- 10) S. Okada et al.: Comprehensive measurement techniques of water flow, bedload and suspended sediment in large river using Acoustic Doppler Current Profiler, River Sedimentation, Proceedings of 13th International Symposium on River Sedimentation (ISRS), pp.1274-1280, 2016
- 11) A. GUL et al.: Analysis of bedform and boil based on observations in Brahmaputra river, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 74, No. 5, I_925-I_930, 2018

萬矢敦啓



土木研究所水工研究グループ
水文チーム 主任研究員
YOROZUYA Atsuhiko

小関博司



研究当時 土木研究所水工研究
グループ水文チーム研究員、現
土木研究所企画部研究企画課主
査
KOSEKI Hiroshi

山本 晶



土木研究所水工研究グループ
水文チーム 上席研究員
YAMAMOTO Akira