## 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

橘田隆史<sup>1</sup>·萬矢敦啓<sup>2</sup>·小関博司<sup>3</sup>·吉川世里子<sup>4</sup>·岡田将冶<sup>5</sup>·工藤俊<sup>3</sup>

 <sup>1</sup>正会員 代表取締役 株式会社ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田 3 丁目 2-18) E-mail: t-kitsuda@hydro-sys.com
 <sup>2</sup>正会員 主任研究員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) E-mail: yorozuya@pwri.go.jp
 <sup>3</sup>正会員 研究員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) E-mail: h-koseki@pwri.go.jp, s-kudou@pwri.go.jp
 <sup>4</sup>非会員 グループリーダ 株式会社ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田 3 丁目 2-18) E-mail: y-yoshikawa@hydro-sys.com
 <sup>5</sup>正会員 准教授 高知工業高等専門学校 (〒783-8508 高知県南国市物部乙 200-1) E-mail: okada@ce.kochi-ct.ac.jp

流水抵抗をはじめとする土砂水理学に関する理解は、実験水路を中心に行われてきた.一方、実河川に おける現象がこれらの知見と整合しない例も散見され、この問題は土砂水理学を考慮した水位流量関係の 構築に課題を残している.他方、近年開発されている観測技術は流況、河床面の多点計測を可能にし、実 河川における計測結果と既往の知見の評価が行われるようになってきた.本研究では準実スケールの実験 水路においてマルチビームを用いた面的なスワス測深と aDcp を用いた流況観測システムを構築した.観 測結果の検証においては、計測された河床波形状が既往の知見に整合し、その移動特性と掃流砂量につい ても妥当な結果が得られた.

Key Words: acoustic Doppler current profiler, Multi-beam echo sounder, sand waves, Space- time image velocimetry

#### 1. はじめに

流砂が伴う河川においては、流況と流砂が相互に作用 することで河床波が発生する. 河床波の形態は河床せん 断力,河床材料に応じて異なり,またその結果,流水抵 抗が変化することが特徴的である.このような流砂現象 は土砂水理学の古典的なテーマであり、現に 1960年代 以降、実験水路を用いた活発な議論が実施され、多くは 体系化されている 12. またこれらは半世紀以上経た現 代においても数値水理学の基礎としてモデル化の根幹を 成している<sup>3</sup>. しかしながら実験水路で設定可能な水理 条件の限界もあり、こうした知見は実河川における現象 を必ずしも忠実に再現しているわけではない。例えば浮 遊砂が卓越する河川における現象はその代表例と考えら れる. 工藤ら <sup>3</sup>はメコン川における観測結果から, 無次 元掃流力の増加に伴い流水抵抗が減少することを明らか にし、既往の知見と相反する事例を紹介している. この ような実河川での現象と実験水路で得られた過去の知見 のとギャップは、水位流量関係の観点から考慮すると課 題の深刻さが際立つ. このため, 実河川で信頼性の高い 観測を行うことは重要なテーマである.

これまで著者らの研究グループは実河川における土砂 水理現象を把握するために、観測手法の開発とそこから 得られた知見を検討してきた.それらは洪水時の流況<sup>4</sup>, 掃流砂<sup>450</sup>,浮遊砂<sup>4</sup>,河床波<sup>57</sup>である.このような作 業は実験水路から得られた過去の知見や数値水理学から 得られた結果を評価すると共に、河川管理の実用に資す る技術の構築に寄与すると期待される.

本研究においては、マルチビームを用いたスワス測深 と aDcp (acoustic Doppler current profiler)を用いた流況計測を 組み合わせることで、土砂水理現象を司る主要な水理量 を把握するための観測システムの構築を試みた.なお、 スワス測深とは超音波を扇状に照射して水底地形を面的 に測深する方法である.また同手法を用いて、北海道開 発局帯広開発建設部が管理する準実スケールの十勝川千 代田実験水路<sup>®</sup>において小規模河床波が発生する条件で 観測を実施した.本論文では構築した観測システムと観 測で得られた小規模河床波に関する知見を報告し、実際 の河川において水面情報を得ることによって河床の状態 を推定する手法について提案を行う.



図-1 観測システムの概要



図-2 MB1と RiverProADCP の実装状況

橋上操作艇	高速低揺動タイプ(3m ボート)	
マルチビームソナー	TeledyneODOM社製 MB1	
aDcp	TeledyneRD社製 RiverProADCP	
RTK-GNSSコンパス	Hemisphere社製 VS330	
RTK-GNSS	JAVAD社製RTK-GNSS(Delta)	
モーションセンサー	TeledyneTSS社製 DMS-05	
その他	データ転送装置(二台)	

表−1 観測機材の構成要素

#### 2. 観測手法と実験状況

#### (1) 観測方法

著者らが構築した観測システムは、マルチビームソナ ーと aDcp を組み合わせることで、流況と精緻な河床形 状を同時に観測するシステムである.著者らが開発して きた橋上操作艇<sup>9</sup>に aDcp とマルチビームを同時に搭載す ることで、両ソナーの時空間的な計測ギャップを解消す ることができる.この様に既存技術を組み合わせて新た な機能と価値を創出した点が当システムの特長であり、 特に洪水時における実河川での観測が可能となることを 意図している.図-1 にその概要を示す.図に示すよう に、スワス測深の向きは千代田実験水路の上下流方向へ 動かしながら観測するため、舟艇から左右に照射される ように取り付けた.aDcp は舟艇の真下を向くように艤 装した.図-2 にマルチビームソナー(MB1)と aDcp (RiverProADCP)の実装状況を示す.

**表-1** は本観測を実施する上で用いた観測機材の構成 要素である.橋上操作艇は土木研究所が所有する長さ 3m の高速低揺動型ボート<sup>10</sup>を加工して用いた.このボ ートは姫川等の急流河川における観測実績を持ちこのよ うな観測を実施するうえで最も揺動安定性が高い舟艇の 一つである.

マルチビームソナーは Teledyne ODOM 社から近年発売 された小型軽量な MB1 を採用した.従来のマルチビー ムはシステムが大がかりになるため小型ボートへの搭載 は難しいが、当機はサイズが L267 W152 H146mm,水中 重量が 4.3kg と小型軽量なため、上記舟艇に搭載するこ とが可能である.また当機はスワス幅 140°内に最大 512 本のクロスファンビームを発射できる.一方、ビー ム幅は 3×4°と国内普及機に比べて見劣りするが、水 深が浅いので精度的に問題無いと考えた.

aDcpは Teledyne RDI 社の RiverProADCP を採用した. こ れは近年発売された河川専用の aDcp で, 20 度の傾斜角 で 4 方向および鉛直下向きのビームを発射することがで きる. 4 本の傾斜ビームが 1200kHz, 鉛直下向きのビー ムは 600kHz である. なお, MB1 の周波数は 200kHz 前後 であるが, RiverProADCP と干渉しないことは事前に確認 している.

GNSS は二種類搭載した.一つは位置情報を得るための RTK-GNSS, もう一つは方位磁石の代用としての RTK-GNSS コンパスである.そもそもaDcpには方位磁石 が内蔵されているが,今回の観測では多くの電子機器を 搭載していることから,局所的な磁場の発生が懸念された.またこの様な磁場により aDcp はかなり強い影響を受けるため<sup>III</sup>,本観測では RTK-GNSS コンパスを採用した.なお,位置情報を取得するための RTK-GNSS は水平 精度±10mm,鉛直精度±15mmのカタログスペックを持つ機種を採用している.

実河川における水面が凹凸を持つような状況において 精緻な地形データを取得するためにはモーションセンサ ーが必須となるため、当システムでは TeledyneTSS 社の DMS-05 を用いた. これは舟艇の揺動を計測し、チルト、 ピッチ、ヒーブデータを基にマルチビームの測深データ を高度に補正するものである.

また通常の aDcp 観測と同様にデータ転送装置を用い ており、観測状況を陸上局からリアルタイムに確認しな がら確実にデータ保存ができる<sup>12</sup>.

#### (2) 実験水路及び実験条件

本検討では北海道開発局帯広開発建設部が実施している+勝川千代田放水路における水路実験の一部を使用している.図-3にその概要を示す.流れは右から左であり,左岸側は鋼矢板,右岸側はコンクリートブロックで1:2の勾配を持つ斜面となる.実験水路の本来の全幅は30mであるが,実験水量の制約から河道を鋼矢板で区切り,水面幅16mの実験区画で実施した.なお移動床は低





水路部の 8m であり,水深は最大で 4m を確保すること が可能である.図の P###は最上部からの距離を m 単位 で示す.また◇の位置には合計7個の簡易水位計を設置 し,水面勾配の観測を実施している.

図の中央に示す Observation boat が図-1 及び図-2 で示し た橋上操作艇で, Observation area を上下流に動かすこと で面的な観測を実施している.またこのときの河床材料 は d50 が 16mm, 均等係数(d60/d10) は 8 である.

本実験施設は上流端に稼動堰を設け、その開度により 流量を調整している.本観測では通水開始から1時間 30分でピーク水位に到達し、その後2時間半程度定常的 に通水し、同様に一時間半程度の時間をかけて通水を停 止させている.このときのピーク水位は 2.5m、ピーク 流量は100m<sup>3</sup>sであった.図-3に示す P473.5 で計測した 水位ハイドログラフと観測時間帯を図-4 に示す.水位 が 1.2mを越えた辺りから観測を開始し、図-3 に示す縦 断方向 25mの範囲内において、側岸から重機のアーム を伸ばして舟艇を係留し、重機を移動させることによっ て上下流方向に観測を行った.縦断片道1回あたりの観 測は 2~3 分程度を要し、往復合わせて合計 63 回実施し た.当該システムの計測限界はボートの耐用流速に依存 するため具体的な性能は未検証であるが、流速 4.0m/s 程 度が限界と推定される.

#### (3) 得られた観測結果の一例

図-5 に 10:25 分頃実施した観測結果の一例を示す.上 図が aDcp で得られた縦断流速分布(縦断図),下図がマル チビームにより得られた河床形状(平面図)であり,高さ





は実験開始時を起点とした標高で示した.流れは図の左 から右向きであり、流速値は流下軸にそった成分を用い た. aDcp の河床形状はマルチビームの測深結果をあて はめている. 図-5 が示すように Dune が形成されている ことがわかる. ここでは二波長程度の波が計測されてお り, 波高が 0.6m 程度, 波長が 10m 程度である. 流速分 布に関しては、上層付近で最大 3.6m/s の流速が計測され ている.また河床付近の流速を見ると、トラフ部分では 流速が遅く、クレストの上部あたりは流速が早い傾向に あり、これは全ての観測結果に共通して見られた. 図-6 は上記で得られた結果を用いて,河床面移動速度, RTK-GNSS より得られた水面高,河床高を示した.流速 補正係数は表面流速と鉛直方向の平均流速の比であり、 aDcp による計測結果から計算している. なお, aDcp の 第1観測層は水面下 27cm となるため、表面流速値は対 数則で外挿補完を行った.また,河床面移動速度は aDcp のボトムトラックと RTK-GNSS の差分から算出し

た. トラフの上 (X=14~16) 近傍では0.9から1.1程度の 値となり、クレストの上(X=5~7)近傍では 0.75 から 0.8 程度,河床波の背(X=9~14)近傍では 0.80~0.90 の 範囲において徐々に値が大きくなる. X>16 が示す隣の 河床波上の流れや、他の実験ケースにおいても数値に若 干の違いがあるものの、これらの結果は河床波上の流況 から派生する流速補正係数の特性を体系的に説明してい るものと考える. このような傾向は、これまで解明され てきた開水路における河床波上の鉛直流速分布、例えば 吉川13が紹介したクレストとトラフそれぞれの特徴と一 致することから,本観測結果は理論的にも整合の取れた 結果であると著者らは考える.水面波高は 0.1m 程度で 波長が10m程度であった.河床高と比較すると同じ波長 で逆位相であることがわかる. これは Dune が水面波形 と逆位相で出現するとされる既往の知見と整合する. 河 床面移動速度に関しては、クレスト付近では値が大きく、 最大で 0.9m/s 程度となる.またトラフ近辺では最小で 0.1cm/s 程度となる. このような傾向は萬矢ら 5の主張と 整合する.

本報では紙面の都合上すべての結果を示すことができ ないが、観測された全ての結果において、ここで示した ような水面高と河床高の逆位相関係、および河床面移動 速度と河床波の縦断位置関係について、同様の結果が得 られている.これらは実験水路などで得られた既往の知 見と整合するが、実河川の中規模洪水クラスにおいて実 証できたことは意義が大きい.

#### 3. 河床波及び流況の挙動

2. では観測結果の一例を示した.本章では得られた すべてのデータを用いて河床波の特性について考察を加 える.

#### (1) 河床波の移動速度

図-7 において2. で示した河床高と RTK-GNSS で取 得した水位を用いて水面波及び河床波の時空間図を作成 した. これは藤田らが提案している STIV<sup>10</sup>に着想を得て いる. 具体的には河床波に関しては,計測開始時刻から 河床高の中心部分の値を切り出し,それぞれの計測開始 時間を縦軸に,縦断距離を横軸にプロットしたものであ る. 水位に関しては一観測あたり中央付近の1測線が計 測されているのでその実測値を採用した. 縦断片道1回 の観測には2~3分程度の時間を要しているが,ここで は開始時刻を代表時間としている. また観測順序は,上 流から下流,下流から上流と往復観測を基本としている. 舟艇の移動速度は16~25cm/s とランダムなバラツキがあ るが,Y軸に計測時刻をプロットすることで舟艇移動速 度の影響は無視できる. また図-4 のハイドログラフと





の関連からすると、図-7における 60 分が 9:10 の時点、 すなわち水位が定常状態になった時間帯と対応している. 図-7 が示すように、河床波による標高差がより明確で あったためか、時空間図には明瞭なラインが見て取れる. これらの傾向は 80 分から開始するラインを境とし二つ に分類される.例えば 60 分から開始するライン(赤実線) は 35 分の時間をかけて上流端から下流端へ 23m 移動し ている.すなわち河床波の移動速度は 0.66m/分となる. 一方で 140 分から開始するライン(赤点線)は 40 分かけて 23m 移動しているので 0.58m/分となる.このような傾向 は前半部で4つ、後半部では4つに明瞭な結果として出 ている.水面波に関しては、河床波ほど明瞭ではないが、 同じような傾向が見て取れる.すなわち 80 分をスター トとして前半部と後半部で傾きが異なり、その傾きから 計算した移動速度は前半部で 0.66m/分、後半部で 0.58m/ 分である.水面波で不明瞭な結果となった理由は、水面 波高が最大 10cm 程度に対して、RTK-GNSS の鉛直精度 が 1.5cm であること、舟艇のヒーブが数 cm 発生してい ることなど誤差要因が大きいことが挙げられる.

#### (2) 河床波の形状特性

図-8は河床波の波高,波長と変化率を3倍強調した水 深の時間変化を示す.これらは図-7の河床波を作成し たデータセットを用いて,一波長ずつ目視で波高と波長 を読み取った結果である.波長は河床波の峰から峰,も しくは谷から谷とし,波高はその一波長において最も高 い標高と最も低い標高の差としている.

図が示すように波高及び波形は開始 28 分後からデー タを採用しているが波高・波長がそれぞれ 0.2m・6m か ら始まり,徐々に発達をして,150 分にはそれぞれが 0.7m・12m となっている.途中,電池交換のために欠測 期間が生じているが,河床波は 170 分あたりまで徐々に 発達し,その後再び小さくなる現象が見られた.

図-8 に水位ハイドログラフを示しているが,予想に 反して河床波の発達と水位変化には明瞭な関係性を見い だすことができない.

図-9 は横軸に無次元掃流力を限界無次元掃流力で除 したもの、縦軸を河床波の波高Hと波長Lの比で対数関 係としてあらわしたものである. 図の曲線は Yalin が提 案した曲線<sup>15)</sup>である. この曲線の適用範囲は 100 $\leq h/d \leq$ 1.04×10<sup>5</sup> (h:水深, d:粒径) とされている. 今回の観測 においては、 $h/d=200\sim350$ になっていることを確認して いる. 無次元掃流力では次式を用いて算定されている.

	$\tau_* = \frac{RI}{(\sigma / \rho - 1)d}$	(1)

ここに、*I*は水面勾配,*R*は縦断平均水深,*σ*は砂粒子の 質量密度,*ρ*は水の質量密度,*d*は砂粒子径(15mm)で ある.水面勾配 I は次のように算出されている.縦断距 離 40mにおける水位計 5 点(P453.5, P463.5, P473.5, P483.5, P493.5)のデータを用いて、1 次関数を仮定した最小二 乗法により算出された各時刻の傾きを観測時間平均 (2,3 データの平均)している.限界無次元掃流力は岩 垣の式<sup>10</sup>により算出されている.図を見ると、全体的に Yalin が提案した式との整合性が高いことがわかる. 部大きく外れるプロットが見られるが、H/L が小さいプ ロットについては、実験開始直後に波高が小さいにもか かわらず波長が大きくなっているケースであり、H/L が 大きいプロットは、波高が大きいものの別の河床波が近 接しているため、波長が小さく算出されたケースである.

#### (3) 河床波の移動速度から算出した掃流砂量

吉川ら「いは河床波の波速,波高から掃流砂量を算定す



るために、河床波近傍を流れる掃流砂をモデル化し下記 の式を提案した.

$$q_B = U_{SV} \times H \times (1 - \lambda)$$

ここに  $q_B$ は掃流砂量,  $U_{SV}$ は河床波の波速, Hは河床波 の波高,  $\lambda$ は間隙である. 図-7 及び図-8 から得られた 結果からデータを拾い上げると,後半部に関して  $U_{SV}$ = 0.58m/分, H=0.5m とすると  $q_B$ =2.9×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/s/m となる. これは小関らが算定した aDcp から得られた河床波の峰 における掃流量 9.12×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/s/m<sup>18</sup>と同オーダーとなり現 状の掃流量式の精度においては整合する結果となった.

#### (4) 水面情報から得られる河床の特性について

図-7~9 で示された河床波特性を受け,次のような議論を展開することができる.1)実河川においても水面波の時空間分布から河床波の速度,波長を算定することが可能であること.2)河床に存在する粒度分布,水面勾配から,Yalinの式を用いてHLを算定することができること.また1)で算定した河床波の波長とYalinの式より河床波の波高を算定することが可能となること.3)1)で得た河床波の波速と2)で得た河床波の波高,吉川らの提案したモデルにより掃流砂量を算定することできること.

#### 4. まとめ

本論文で検討した項目とそこから得られた知見を以下 のように列挙する.

- 面的な河床形状と流況を同時に観測が可能となる計 測システムを構築した.これは日本国において課題 とされている洪水中の流量の不確実性の要因を解明 する糸口となる.この手法により,洪水中の河床高 分布が分かるだけでなく,河床波による流水抵抗の 議論を進めることが可能となり,土砂水理学に基づ いた水位流量関係の新たな議論を提供できる.
- 2) 本手法により計測された河床形状は定常状態においては既往の知見に整合する結果となった.特に河床に存在する粒度分布,水面勾配から,H/LがYalinの式と整合したことを示した.

3) 河床波の移動速度は掃流砂量の観点から妥当である ことが評価されている.この結果から、水面情報を 用いて河床波の移動特性を予測し、掃流砂量の予測 や流速補正係数のモデル化が可能となることが示唆 された.

謝辞:北海道開発局帯広開発建設部には千代田実験水路 において観測場所と実験設備の供与に加え,河床材料調 査結果と水位データを提供して頂いた.株式会社水文環 境の井上氏には橋上操作艇の加工で多大なるご助力を頂 いた.ここに記して感謝の意を表す.

#### 参考文献

- Engelund, F.: Closure to "Hydraulic Resistance of Alluvial Streams." Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.93, No. HY-4, pp.287-296, July, 1967.
- 2) 岸力,黒木幹男:移動床流における河床形状と流体抵抗
   (I),北海道大学工学部研究報告,pp.1-23,1973.
- 工藤俊,萬矢敦啓, EDPPERERA,小関博司,岩見洋
   一,中津川誠:メコン川下流域の洪水氾濫に対する観測 結果を反映した河道条件の影響分析,土木学会論文集
   B1(水工学)Vol.72, No.4, L\_145-L\_150, 2016.
- 4) 岡田将治,萬矢敦啓,本永良樹,橘田隆史: ADCP による洪水流況・掃流砂・浮遊砂量の同時計測技術 構築のための基礎的検討,土木学会論文集 B1(水工 学), Vol.69, No.4, I\_751-756, 2013.
- 5) 萬矢敦啓,岡田将治,江島敬三,菅野裕也,深見和 彦: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.
- 6) 岡田将治,和泉征良,竹内慈永,萬矢敦啓,橘田隆 史:ADCPとRTK-GPSの実測データに基づく掃流砂 量推定手法の考察,土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, I\_631-636, 2014.

- Koseki, H., Yorozuya, A., Kudo, S. and Iwami, Y.: Development of a system to measure bed forms and vertical velocity profiles in a river channel., River Flow 2016, pp.1557-1565, 2016.
- 千代田新水路の概要及び千代田実験水路,国土交通省北 海道開発局帯広開発建設部,

http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/chiyoda/index.html

- 9) 岩見洋一,萬矢敦啓,工藤俊,小関博司:河床変動を考慮した設置型流速計による洪水流量観測手法に関する研究,運営費交付金による研究成果,平24~平28
- 10) 流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編)Verl.2, 国 立研究開発法人 土木研究所 https://www.pwri.go.jp/team/hydro\_eng/manual.htm
- 11) 萬矢敦啓,岡田将治,橘田隆史,深見和彦:日本における ADCP を用いた高水流量観測手法,河川流量観測の新時代,第2巻 pp.3441,2011.
- 12) 橘田隆史,下田力,疋田真:河川砂防技術基準調査編に 準拠した ADCP による洪水流量観測手法について,なが れ,第.32巻, pp.377-382, 2013.
- 13) 吉川秀夫:流砂の水理学,丸善株式会社, pp.66,1985.
- 14)藤田一郎,椿涼太:時空間画像を利用した河川表面波紋の移動速度計測,河川技術論文集,第9巻, pp.55-60,2003.
- Yalin, M.S. and Karahan, F.: Steepness of sedimentary dunes, *Proc. ASCE*, Vol.105, HY4, pp.381-392, 1978.
- 16) 土木学会編「河川編」『水理公式集』(平成11年版) 丸善, 1999.
- 17) 吉川秀夫:流砂の水理学, 丸善株式会社, pp.176,1985.
- 18) 小関博司,萬矢敦啓,工藤俊,橘田隆史,岩見洋一:実 河川における掃流砂量と有効摩擦速度の評価方法,水工 学論文集,第61巻,2017.(投稿中)

(2016.9.30 受付)

### DEVELOPMENT OF A MEASUREMENT SYSTEM FOR BED-FORMS AND VERTICAL VELOCITY PROFILES; OBSERVATION OF THE SAND-WAVES BEHAVIOR

# Takashi KITSUDA, Atsuhiro YOROZUYA, Hiroshi KOSEKI, Yoriko YOSHIKAWA, Shoji OKADA and Shun KUDO

In previous studies, the experiment for flow resistance has been conducted at experimental flume, however its results could not ensure the consistency with the data measured at actual river. This incon-sistent results affect establishment of rating curve based on sediment hydraulics. Meanwhile, the meas-urement instruments for vertical velocity profile and sand forms are evaluated on recent studies.

In this study, a new measurement system mounting Multi-beam echo sounder and aDcp is proposed. The measured results using this system show the reasonable consistency between sand waves and previ-ous study. Additionally, sand-wave migration is measured by Space Time Image Velocimetry. The results show bedload discharge estimated by the migration and by aDcp shows the reasonable consistency.