実河川でのADCPとMBESによる河床波 と掃流砂観測

OBSERVATION OF SAND WAVES AND BEDLOAD DISCHARGE WITH ADCP AND MULTIBEAM ECHO-SOUNDER IN ACTUAL RIVER

橋場雅弘¹・萬矢敦啓²・小関博司³・土田宏一¹ Masahiro HASHIBA, Atsuhiro YOROZUYA, Hiroshi KOSEKI and Koichi TSUCHIDA

□正会員(株)福田水文センター(〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)
 □ご会員 Ph.D. 国立研究開発法人 土木研究所 水工研究グループ(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
 □③正会員 国立研究開発法人 土木研究所 水工研究グループ(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

In this study, the authors conducted the multipoint measurement of riverbed by MBES and the bedload velocity by ADCP mounted on a manned-control boat during snow melting flood in Ishikari River. At the 2 section of about 40 m in a longitudinal direction, we measured bedform repeatedly in order to monitor the movement of the waves. In addition to that bed materials were sampled at 12 points by the Kumada Dredge sampler. Based on the observed results, the followings aspects were obtained. 1) Sand wave were measured which is the height/length of 0.07 m. 2) The moving speed of sand wave analyzed using the space-time image velocimetry (STIV) method. 3) Observed the sand wave and the bed shear stress showed good agreement with the curve constructed by Yalin (1978). 4)Regarding the bed load discharge, two different methods were compared. First one is the bed form migration, which is the function of the wave height and the wave speed proposed by Kikkawa (1985). And second one is the method using ADCP proposed by Koseki et al (2016). Those two results show good agreement.

Key Words : Sand wave, Bedload discharge, ADCP, MBES

1. はじめに

現地河川での流砂の計測は、流域の土砂動態を把握す る上で重要である.特に、洪水時の河道内掃流砂量の時 系列把握は、河道計画や維持管理を行う上で不可欠な基 礎データになる.実河川での流砂計測は、直接採取型と して、アメリカ地質調査所が正方形型のHelley-Smith式 掃流砂サンプラーを開発している¹⁾. 曽山ら²⁾はバケット を横長にした改良H-Sサンプラーを開発している. 建設 省土木研究所では、バックホウのバケット先端に採砂器 をワイヤで吊るして取得する方法などが提案されてきた 3. しかしながら、洪水時の実河川では採砂器を水中や 河床に着底させることが困難である一方で、クレーンな どの重機を配するなど大変な労力を要し、技術的に容易 ではなかった. そこで, 音響センサを用いたハイドロ フォンによる観測手法が砂防河川を中心に広く用いられ るようになった. 堤ら⁴は鋼製パイプ内にマイクロフォ ンを導入し、砂礫の衝撃を発生する音圧とパルスで計測 するハイドロフォンを用いた観測を開発した. 小柴ら5 はプレート型振動センサを用いて、2mm程度の小粒径へ の適用を示した.しかしながら、これらは河川の横断方 向にセンサを設置するため、川幅、水深スケールの小さ い砂防河川に限定されるもので、フルスケールの実河川 への適用は困難であった.しかし、近年のADCPをはじ めとする超音波機器の発展によって、流砂観測が大きく 進歩した.Rennieら[®]は洪水中の土砂移動の測定手法と して、ADCPの対地速度(BT速度:ボトムトラッキン グ速度)が掃流砂の速度を示すという仮定を提案してい る.萬矢らⁿはADCPの鉛直流速分布を用いた摩擦速度 の算定手法を開発した.小関ら^{®®}はBT速度から流砂速 度を算出し、江頭ら¹⁰の式により掃流砂量を算出する方 法を開発している.上原ら¹¹は、移動床水路実験で、掃 流砂の移動速度を画像解析STIV法で測定し、BT速度と 合致することを示している.

本研究では、こうした技術を実河川で適用できるかを 検証するために、出水時の実河川(径深R/粒径d: R/d=12000)において、小関ら⁸⁹⁹が推奨するADCPのBT速 度による掃流砂量の算出方法と、MBES (Multi-Beam Echo-Sounder)から算出した砂堆形状と河床波の伝播速 度を用いて、吉川¹²⁰の手法で得られた掃流砂量を比較し、 実河川における適用性を検証した.

(1) 観測フィールド

観測は2018年4月24日~26日に実施した.図-1に観測 サイトの位置を示す.観測地点は河口から26.5kmの石狩 大橋水位流量観測所である.当流域では4月上旬からは 融雪期にあたり,夏期出水時に次ぐ高い水位が4月上旬 から1ヶ月程度継続する.図-2には現地観測の実施時期 と水位の変動を示す.なお,観測期間中の流量規模は 1300~1600m³/secであった.

(2) 観測システムと方法

5人乗り有人操作船(全長5.87m×全幅1.84m, 重量320 kg, 20馬力: SUZUKI GYO)に、図-3のようにADCPと MBESを取り付けて曳航した.

a) ADCP

ADCPはTeledyne RD Instruments社製のRiver Pro ADCP を用いた.本機は有人操作船の側方にワイヤーロープで つなぎ,船と同じ挙動を示すようにセッティングした. River Pro ADCP は1200kHzの20度にスラントした4ビー ムと600kHzの真下方向に照射する1ビームの受送信で, 流速と船の移動速度をボトムトラッキングで取得した.

b) マルチビームソナー

河床を面的に測深するMBESは、Teledyne Reson社製の SeaBat T20pを用いた.本機は350kHzの周波数で256ビー ムを発射し、スワス角は120度を基本とした.

c) 土砂サンプラー

河床材料は図-4に示した熊田式ドレッジを用いた.船 上からロープで固定したドレッジサンプラーを河床に落 とし、手動又は船で曳航した後、船上に引き上げて堆積 物を回収した.取得したサンプルを河床表面の材料とみ なし、JISA1204「土の粒度試験方法」のふるい分析法に よって粒度分析を行った.

d) 水面勾配測定

観測箇所の水面勾配を取得するために、水圧式水位計 (Oyo社製S&D mini)を、ロープワイヤーを付けた鋼製 の5kg錘に取り付けて、河床に落として設置した.測定 インターバルは10分間隔とした.任意時間にレベルで水 面標高を測定し、水位計の測定値との比高差から水位を 算出した.設置箇所は、図-5のように上流(WL1)、中 流(WL2)、下流(WL3)の3箇所とした.なお、WL1 からWL3の距離は1238.56mであった.

(3) 観測方法

まず初めに、図-6に示す縦断距離約500m、横断距離約100mの区画をADCPに搭載したRTK-GNSSとADCPのボトムトラッキングの差から、河床表面に動きがあるかを把握し、同時にMBESで河床波の有無を把握した.ここで条件に合致した縦断方向約40mの上流と下流の2つ



図-3 ADCP&MBES観測システム概要



図-4 河床材料採取器(熊田式ドレッジ)



図-5 水面勾配用水位計設置箇所



図-6 MBESによる河床形状

のエリアを選択し、河床波の移動を把握するために以下 の区画を抽出した.それぞれの区画で観測のタイミング は以下の3回実施した.

No.1:下流区間(4月24日14時09分~14時26分)

No.2:下流区間(4月26日14時44分~14時55分)

No.3:上流区間(4月26日14時30分~14時42分)

No.1とNo.2は同じ区間だが,No.1の水位はNo.2よりも 0.12m高い状況であった. 観測船は上流端位置に移動し た後,エンジンを止めて流れ方向に沿って自然流下した. 再び上流端位置に移動し,それぞれ3回繰り返した.

3. 観測結果

(1) 河床材料と水面勾配

石狩大橋右岸下流部においてMBESで測定した河床形 状と河床材料の採取地点,水面勾配の水位計設置箇所を 図-6に示す.河床波測定と掃流砂量算出は下流側のNo.1 &No.2と上流側のNo.3の区画で行った.河床材料の採取 位置は赤丸で,No.1&No.2の掃流砂量の算出には河床材 料6を,No.3では河床材料9の地点を使用した.河床コン ターの色はMBESによる深度を示し,色が青いほど深い エリアとなり,左岸よりも右岸が深く,さらに縦断方向 の浚渫跡と推察される水路部が明瞭にみられている.周 囲には小規模河床波が明瞭に発生している.図-7は、3 地点の水位の時系列変化を示すが,水位変動は同様で, いずれも下降傾向であった.水面勾配はWL1とWL3の

"水位差/距離"によって算出した.水位は変化するが 水面勾配に大きな変化はみられなかった.図-8は、河床 材料採取地点の粒度の加積曲線で,No.1&No.2の分析に は河床材料6の60%粒径(d60=0.60mm)を用い,No.3に は河床材料9の60%粒径(d60=0.48mm)を用いた.



表-1 河床波形状

サンプル	河床波数	平均波長(m) (最小-最大)	平均波高(m) (最小-最大)	波長/波高
No.1	7	4.4(2.4-6.4)	0.30(0.13-0.43)	0.07
No.2	8	4.4(2.8-5.5)	0.31(0.15-0.42)	0.07
No.3	6	6.7(3.8-9.0)	0.49(0.18-0.80)	0.07

(2) 河床波形状

図-6の河床波測定ラインから抽出した河床波の形状は, 表-1に示すように,平均波長は4.4~6.7m,平均波高は 0.30~0.40mで,波高/波長はいずれも0.07であった.図-9~図-11に河床波測定ラインの河床コンターと時間別の 河床波の縦断形状を示すが,時間経過とともに河床波が 下流に移動している様子がわかる.



(3) 河床波伝播速度

No.1~No.2地点において,RTK-GNSSとMBESによっ て縦断的に近似したラインを航行して得られた河床高分 布から,同一座標のラインを抽出した.次に縦軸に縦断 距離,横軸に時間として,図-12に示す河床高分布の時 空間画像を作成した.時空間画像は藤田ら¹³が河川の表 面流速を動画像から算出するSTIV法 (Space-Time Image Velocimetery)を用いているが,観測時間が3回と短いた め縦軸と横軸を交換して示している.ここで,河床波の 標高の高いクレスト部が緑~赤色に,標高の低いトラス 部が青色で描かれる.時間経過とともに河床波のクレス ト及びトラスが斜め下方向に移動しており,この傾きを 河床波の伝播速度とした.結果として,No.1は0.05 m/ min (=0.0008 m/sec),No.2は0.08 m/min (=0.0013 m/ sec),No.3は河床波の移動が明瞭でなかった.



4. 河床波と無次元せん断力の関係

Yalin¹⁴によって提案された無次元せん断力r_{*}と河床波 の波高/波長の関係を、2種類の摩擦速度u_{*}から求めた. 一つは水面勾配と径深の関係(1)式による結果を図-13 に、もう一つは江頭ら¹⁰の(2)~(6)式による結果を 図-14に示す.

$$\mathbf{u}_* = \sqrt{gRI_e} \tag{1}$$

ここで、gは重力加速度9.8、Rは径深、 I_e は計測した水面勾配を与えた.

$$\frac{u_s}{u_*} = \frac{4}{15} \frac{k_1 k_2}{\sqrt{f_{d+f_f}}} \tau_*$$
(2)

ここで, K₁は勾配に関する係数, K₂は相対水深に関する 係数, f_a は粒子衝突に関する係数, f_fは間隙水に関する 係数である.

$$K_1 = \frac{1}{\cos\theta \{\tan\varphi_s/(1+\alpha) - \tan\theta\}}$$
(3)

ここで、 φ_s は砂粒子の内部摩擦角、 θ は河床勾配、 α は 動圧静圧で0.25を与えた.

$$K_2 = \frac{1}{c_s} \left[1 - \frac{h_s}{h_w} \right]^{1/2} \tag{4}$$

ここで、 c_s は掃流砂層厚 h_s 内の平均土砂濃度で、 h_w は水深を示す.

$$f_d = k_d (1 - e^2) (\sigma/\rho) c_s^{1/3}$$
(5)

$$f_f = k_f (1 - c_s)^{5/3} c_s^{-2/3} \tag{6}$$

ここで、 k_d =0.0828、 k_f =0.16を与えた.ここで算出された2つの u_* から無次元せん断力 τ_* を式(7)で算出する.

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} \tag{7}$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 σ は土粒子の水中比重で1.65を、 ρ は水の密度で1.00を、dは粒径(d60)をそれぞれNo.1 &No.2=0.60nm、No.3=0.48nmを与えた.なお、無次元 限界無次元せん断力 τ *cは岩垣¹⁵の式により0.04とした. 結果として、図-14は図-13に比べて横に広がるようにプ ロットされた.これは、図-14がADCPによる河床面移動 速度 u_b を用いているからである.いずれにしても2つの 無次元せん断力と小規模河床波の波形勾配の関係が Yalin¹⁴のダイアグラムに良く合致した.

5. 掃流砂量の算出

吉川¹²は、砂堆のクレスト部における掃流砂量 q_b と河床 波の伝播速度 U_w と波高Hの関係は、 q_b がすべてクレス ト部の下流のトラス部に堆積すると仮定して、式(8) を算出している.

$$q_b = (1 - \lambda)H \cdot U_w \tag{8}$$





図-14 Yalinの河床波形状と抵抗(江頭の式)

ここで、掃流砂量 q_b の算定は、河床波のクレストにおける伝播速度 U_w 、波高H、土砂の間隙率 λ を示す。河床波の波長はMBESの実測値、伝播速度 U_w はSTIV解析から得られた実測値を用いた。一方で、小関ら⁸⁰は、江頭ら¹⁰が提案した掃流砂式とADCPが実測計測する河床面移動速度 u_b を用いて掃流砂量を算出した(式(9))。

$$q_b = \int_0^{h_s} c \cdot u \cdot dz \cong \alpha_{bs} \cdot u_b \cdot h_s \cdot c_s \tag{9}$$

ここで、 q_b は u_b を用いた掃流砂量、 α_{bs} は u_b から u_s (掃流砂層の層厚平均移動速度)を算出するための更生係数

 $(u_s = \alpha_{bs} \cdot u_b)$, h_s は掃流砂層厚, c_s は掃流砂層内の h_s の平均土砂濃度である. α_{bs} は小関ら⁸⁾⁹, 上原ら¹¹⁾の 研究で適当とされた0.65を用いた. c_s は掃流砂層の表面

 $(z=h_s)$ における濃度を0とし、静止土粒子の上端z=0における濃度は固定地盤内の空隙率0.4を用いて0.6とし、層内の分布は直線的に近似されるとして $c_s=0.6/2=0.3$ とした. h_s は式 (10) で示される.

$$\frac{h_s}{d} = \frac{1}{c_s \cos\theta \{\tan\varphi_s - \tan\theta\}} \tau_* \tag{10}$$

ここで、dは粒径、 φ_s は砂粒子の内部摩擦角、 θ は河床 勾配、 τ_* は無次元せん断力を示す、dは河床材料採取結

表--2 掃流砂量

サンプル	吉川(1985)	小関ら(2016)	
	$(\times 10^{3} \text{m}^{3}/\text{s/m})$	$(\times 10^{3} \text{m}^{3}/\text{s/m})$	
No.1	0.24	0.13	
No.2	0.18	0.04	
No.3	NG	0.07	

果から0.6mmを用いた. θはADCPの4ビームの座標値か ら推定される3次元平面の平均流向における勾配として いる. ADCPを用いた河床面移動速度ubからの掃流砂量 の検証として、小関ら89は、実験水路内に沈砂ピットを 掘って沈砂量を比較した.しかし、実河川では沈砂ピッ ト設置は非常に困難なため、MBESで計測したUwと河床 波形状から吉川12の式で得られた掃流砂量をリファレン スとして評価した.表-2に示す,3回の観測での吉川¹²⁾ の手法と小関ら⁸⁹の手法で得られた掃流砂量では、Uw が不明瞭で算出できなかったNo.3を除き、掃流砂量につ いては、吉川¹²の式から算出した掃流砂量(0.18-0.24× 10⁻³m³/s/m) とu_bを用いた, ADCPから算出した掃流砂 量 (0.04-0.13×10⁻³m³/s/m) は同じオーダーで合致した. これより, 実河川 (R/d =12000) において, ADCPによ る掃流砂量観測の妥当性を確認した. ADCPはMBESに 比べて小型軽量であり、出水時でもボート浮体に搭載し て橋上等から人力操作が可能である.また,橋上では横 断方向の移動が容易なため、全体の流砂量を算出するこ とができる.以上より、ADCPを用いることで実河川で の掃流砂量観測の可能性を高めると同時に、流砂量の精 度向上にも資するものと期待できる. 今回は実河川の掃 流砂量の検証を吉川12の手法としたが,流砂現象が活発 な場合は、クレスト上で発生した掃流砂量がすべて下流 のトラスに堆積せず、流下してしまうことも考えられる ため⁹, さまざまな手法との検証を進めていく必要があ る.

6. まとめ

- 本研究では実河川において、MBES、ADCPを同時 に用いることで河床波の形状、河床波の移動を同時 に測定することができた。
- 2) MBESで測定した河床波の形状は,平均波高0.30-0.49m,平均波長は4.4-6.7mであり,波高/波長は0.07 であった.
- MBESの河床高測定結果からSTIV (Space-Time Image Velcimetry) 法を用いて, 0.05 m/min (=0.0008 m/sec) から0.08 m/min (=0.0013m/sec)の河床波伝 播速度Uwを算出した.
- ADCPの河床面移動速度*u_b*とサンプリングされた堆 積物から推定される摩擦速度を取り入れて、河床波 の無次元せん断力τ_{*}を推定した.結果はYalin¹⁴の曲 線と一致した.

5) 実河川での掃流砂量を2つの異なる方法で比較した. 河床波の波高,波長と河床波の伝播速度 U_w から算 出する方法と, ADCPの河床面移動速度 u_b を使用 する方法での掃流砂量は同じオーダーであった.

謝辞:北海道開発局札幌開発建設部には観測場所を提供 して頂いた.ここに記して感謝申し上げます.

参考文献

- Helley, E.J., and Smith, Winchell: Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler, U. S. Geological Survey Open-File Report, 1971.
- 2) 曽山和宏・大熊義史・畠中泰彦・浅野文典・福岡捷二: 河川の掃流砂量の測定と掃流砂量観測技術・評価技術に 関する研究,河川技術論文集,第17巻,2011.
- 3) 建設省土木研究所, 掃流砂量観測, 1970.
- 4) 堤大三,野中理伸,水山高久,藤田正治,宮田秀介,市田児太朗:掃流砂観測におけるプレート型ジオフォンと パイプ型ハイドロフォンの比較,京都大学防災研究所年報,(57),pp.385-390,2013.
- 小柴孝太,角哲也,堤大三:プレート型振動センサを用いた掃流砂量計測手法に関する研究,土木学会論文集B1 (水工学), Vol.72, No.4, L_925-L_9*30, 2016.
- Rennie, C.D., et al.: Measurement of bed load velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, J.Hyd. Eng., Vol.128, No.5, 2002.
- 7) 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.
- 8) 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,土木 学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.4, I_763-I_768, 2017.
- 9) 小関博司,萬矢敦啓,工藤俊,橘田隆史,岩見洋一:砂 堆の伝播速度に着目した掃流砂層表面の速度の推定法, 土木学会論文集B1(水工学),Vol.74,No.5,I_805-I_810,2018.
- 江頭進治,宮本邦明,伊藤隆郭:掃流砂量に関する力学 的解釈,水工学論文集,第41巻, pp.789-794, 1997.
- 上原有稀・岡田将治・萬矢敦啓・小関博司: 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, I_631-I_636, 2018.
- 12) 吉川秀夫:流砂の水理学,丸善株式会社, pp.176,1985.
- 13) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a nonintrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), International Journal of River Basin Management, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- Yalin, M.S. and Karahan, F. : Steepness of sedimentary dunes, Proc. ASCE, Vol.105, HY4, pp.381-392, 1978.
- 15) 土木学会編「河川編」『水理公式集』(平成 11 年版) 丸善, 1999.

(2019.4.2受付)