

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760402

研究課題名(和文) 河川洪水時の土砂移動形態の解明とその工学技術への応用

研究課題名(英文) Clarification of sediment dynamics during flooding and its application to the river engineering

研究代表者

萬矢 敦啓 (YOROZUYA, Atsuhiko)

独立行政法人土木研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：00314740

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、河川洪水時の土砂移動形態を解明することと、その工学技術への応用である。ここでは日本でも急流河川の代表である姫川の山本観測地点において観測結果を基本とした議論を展開した。ここでは設置型計測器を用いた河川水の流速、複数の水位計を用いた水面勾配の観測、洪水時の河床高の計測を実施した。これらの観測結果を用いて流水抵抗の考え方を導入し、流況に応じた小規模河床波を分析した。またこの結果から水深を予測し、観測結果と概ね一致していることを確認した。また河川の表面情報である流速と水面勾配から河床変化を考慮した流量値の算出方法を体系化した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to understand sediment dynamics during flooding in rivers, as well as application to the river engineering. This study developed the discussion based on observational results as well as the classic sediment hydraulics. The observation was conducted at one of the steepest river using the non-contact current meter for velocity, multiple water gauges for water surface slope, and echo sounder for river bed elevation change. Based on those observed results, types of micro-scale bed form were analyzed depending on the flow stages applying the knowledge of hydraulic resistance of alluvial streams. In addition, estimation of river bed evolution was carried out with the hydraulic resistance, whose results were fairly reasonable compared with the observed results. Finally, this study developed the methodology to estimate the flow discharge considering the river bed elevation change based on the water surface information, such as water surface velocity/slope.

研究分野：河川工学

キーワード：土砂動態 河川水流量観測 河床変動 河床高自動計測 aDcpの活用

1. 研究開始当初の背景

応募者はこれまで、日本の河川の洪水時における計測技術の開発に携わってきた。それらは設置型流速計を用いた無人自動流量観測に関する技術と、Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)を活用した河川水観測技術の開発である。前者は、電波技術や画像技術を応用した設置型流速計を用いて河川水流速の自動計測に向けた試みである¹⁾²⁾³⁾。ここでは ADCP による観測結果と比較することで、設置型流速計の妥当性とそれを用いた河川水流量値への可能性を示唆している。後者は日本に代表される洪水時の河川における水面が大きく振動する状況での観測技術の開発である。ここでは無人の小型ボートに ADCP を搭載し作業員が橋から同ボートを操作して、水深、河川水の横断方向及び鉛直方向の流速分布を把握することである⁴⁾。その後同観測技術を用いた洪水時の観測結果が徐々に増えるに従い、河床における土砂輸送に関連した事象が徐々に明らかになってきた¹⁾²⁾。例えば、川の水位が上昇し流量が増加すると、河床高が変化する場合もあれば変化しない場合もあること、河床波が通過することで河床高が大きく振動すること、さらに河床を流れる土砂(以後掃流砂)の非定常性や空間分布である。これらは応募者が初めて示した¹⁾²⁾⁵⁾。

一方、既往の研究では、河床には小規模河床波、中規模河床波の存在を認めているが、これらの現象の解明及び工学的な議論は実験的な検討及びコンピュータシミュレーションによる計算結果⁶⁾等がある。これらの知見によると河床波は河川水の流れの大きさにより複数の形態がある。小規模河床に関しては、その形態毎に粗度係数が大きく異なることが知られている⁷⁾。また中規模河床波の波高は洪水時の水深と同程度の規模となる。それ故に、中規模河床波の存在、またその移動は川底の最深河床の位置に関して支配的な要因となる。このような小規模河床波の移動に伴う粗度係数の変化、中規模河床波による河床高の変化は、実験室による知見は数多くある⁸⁾ものの、日本の河川における計測事例は稀有である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、河川洪水時の土砂移動形態を解明することと、その工学技術への応用である。土砂移動形態を解明するために、小規模河床波に着目する。また工学的なアウトプットとして、河床変動が大きい河道における河川水流量の算定方法を議論する。

河川水流量を適切な精度で取得するためには小規模河床波に伴う河床高・河床粗度の変化を把握し、その結果を計測結果に反映させることになる。既往の手法は、流速計による流速の把握、平均流速の算定、低水時に得られた河床高の計測から得られる水位と断面面積の関係、これらの結果を用いて流量値を

算定するが、前述のように河床高が大きく変動する場合には、このような手法は大きな不確定要素を残すことになる。

本研究では、水面から得られる情報として設置型流速計から算定した流速値、複数の水位計から算定した水面勾配を用いて河床変動を考慮した流量の算出方法を議論する。

3. 研究の方法

本研究は観測をベースにしたデータ取得と、土砂水理学の知見である流水抵抗から、河床粗度係数を算出し、それらの知見から流量値を算定するものである。次の式は流れの等流条件を仮定した平均流速を算定するものである。

$$V = \frac{1}{n} h^{2/3} i^{1/2} \quad (1)$$

ここで V は平均流速、 h は水深、 i は水面勾配、 n は河床粗度係数である。前述のとおり、平均流速、水面勾配が水面情報となる。このように河床粗度係数を算定することができれば水深を得る。さらに同水深と計測された水位から河床高を算定することになる。またここから算定された河床高を検証するために、音響技術を用いた河床高計測を実施する。ここでは橋上操作艇に搭載した手法と、H 鋼又は橋脚に設置する自動観測方法を採用する。以下、それぞれの手法を概説する。また本報告では姫川の山本観測地点で実施した結果を用いる。

(1) 設置型手法を用いた流速観測

ここでは携帯型電波式流速計を採用した。これは周波数 24.15 GHz のホーンアンテナをもつ電波を利用し、半値角が約 12 度である。ここでは俯角 40 度で水面に電波を照射する。照射域の面積は、水位に応じて変化するが、姫川の場合は概ね数 m 程度の楕円形となる。すなわちこの程度の照射域の計測結果から流速値を得ていることになる。また計測方法は毎正時に 1 秒間隔で 30 秒間取得したデータを、異常値等を間引いて平均した値を採用している。また区分断面は約 10m に 1 断面を設定した。本観測の低水路幅は最大でも 90 m 程度であった。

(2) 橋上操作艇に搭載した河床高観測

橋上操作艇には aDcp (acoustic Doppler current profiler: 超音波ドップラー式三元流速計、WH1200kHz) と GNSS(Global Navigation Satellite System)、音響測深器を搭載している。本来、この計測手法を用いた場合、流量値を得ることができるが、厳しい流況のために GPS や音響測深器の不具合が生じたため当初想定していた aDcp を用いた流量値を得ることができなかった。しかしながら aDcp が持つ反射強度のプロファイル値から河床高を算定する方法を構築⁹⁾することができたため、ここでは aDcp を河床計測に特化したものとして扱うことにする。なおこの手法は作業員から橋上から舟艇を操作し

ながら横断観測を実施することで、洪水中の横断的な河床変化を把握することが可能となる。また流況によっては舟艇を水面に着水することが困難になることがあり、そのような状況ではデータが取得できない場合がある。



図-1 姫川における 3m 艇を用いた観測状況

(3) 橋脚に設置した河床高自動計測

この手法は橋脚に音響測深器を設置し、ある特定の点における河床高をモニタリングするものである。ここで採用した測定器は、ODOM 社の CVN であり、トランスデューサは 200kHz と 33kHz の 2 周波を持つ。センサーは合計 2 セット用意し、同センサーが水没後データが取得できる。また(2)の手法と比較すると、この手法を無人観測であること、点計測であること、流況によらず計測が可能であることが特徴的である。



図-2 姫川山本観測地点の水道橋に設置した観測機材

(4) 流水抵抗を活用した河床高の算定

流水抵抗は河川の水面勾配やそのときの流速から概算される流体力(せん断力)から、そのときに存在する小規模河床波を推定し、その河床波の形状に起因する抵抗から河床粗度を算定するものである。既往の研究として Engelund¹⁰⁾や岸・黒木¹¹⁾の業績があるが、ここでは後者の式を採用した。流水抵抗に関する多くの式は $\tau_* = \tau_*' + \tau_*''$ 関係に着目した分析を行うが、 τ_*' と τ_*'' の間には以下の関係がある。

$$\tau_* = \tau_*' + \tau_*'' \quad (2)$$

ここで、 τ_*'' は無次元掃流力のうち形状抵抗分である。(2)式は τ_*' (全抵抗)は τ_*' (表面抵抗)と τ_*'' (形状抵抗)の加算であることを示した式であり、小規模河床波が発達して形状抵抗が増加すると、 τ_*'' が増加し τ_*' を占める τ_*' の割合が減少するという関係にある。岸・黒木式の特徴はこの考え方に相対水深を導入したことである。詳細は?を参照されたい。

ここから得られた τ_*' 関係とその関係から得られた平均流速、(1)式から河床粗度を算定する。さらに、(1)式から水深を推定後、観測された水面勾配および水位から河床高を算定した。

本研究の最大の特徴は実河川実洪水における観測結果を用いて上記の τ_*' 関係を構築していることである。さらに、ここで構築された関係は全観測断面で採用できることを想定している。このために、(3)で採用している河床高自動計測の結果は流水抵抗を検証するものであることから、一地点における計測も特に横断観測が実施できないような流況における計測結果は、あらゆる流況における τ_*' 関係を構築する意味において重要な役割を持つことになる。また例外的な取扱をする必要があるものとして、例えば高水敷に大きな植生等が存在し、流水抵抗が小規模河床波に起因しない場合は注意が必要である。

(5) 河床変化を考慮した流量値の算定

上記の(1)から得られた流速値に流速補正係数である 0.85 を乗じたもの、(4)から得られた河床高を採用して流量値を計算する。

4. 研究成果

3. の手法と対応して、それぞれの項目に応じた結果の概要を示す。

(1) τ_*' 関係の構築

図-3 は観測データより得られた 4.(1)、4.(2)で得られた観測結果を用いて構築した τ_*' 関係である。図が示すように、観測データは、 τ_*' で 0.1 から 0.3 程度まで広がっている。また小規模河床波の分類によれば、Dune II や Transition II に到達するような流況も存在した。プロットと実線が良く対応しており、河床形態は Dune II であることが示唆される。今回使用したデータのフルード数は 0.6~1.0 であるが、この値も Dune 河床と矛盾しない。

次に図-4 は実測河床高と推定河床高を比較したものである。全体としては、計算河床高は実測河床高を十分に再現しており、流速を入力値とした τ_*' 関係を用いた河床高の推定が適切に行われたと判断できる。

さらに、計算河床高を用いて計算した流量(計算流量)の精度を検証するために、aDcp 観測が部分的に実施されたケースを用いた計算流量と aDcp で観測された流量の比較を図-5 に示す。両者を比較すると計算流量は

aDcp 観測流量を良好に再現していることがわかる。また、水位と計算流量の時系列変化を比較すると、水位はそのピーク付近ではほとんど変化しないにも関わらず、計算流量が上昇していることがわかる。これは流速の増加及び河床洗掘を考慮した結果であり、水位と流量の一对一の対応付けでは把握できない重要な現象を示している。

参考文献

1) 萬矢敦啓ら：非接触型電波式流速計を用

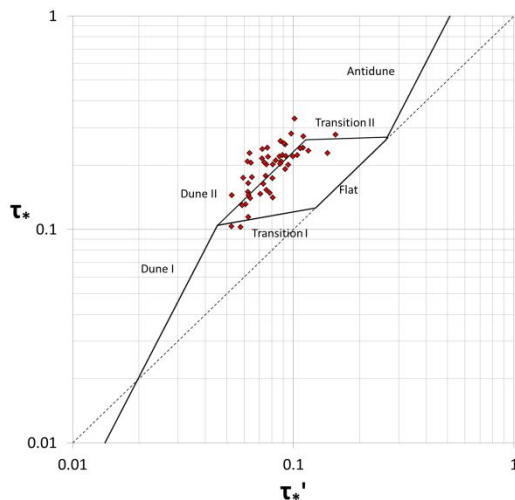


図-3 観測データにより構築された

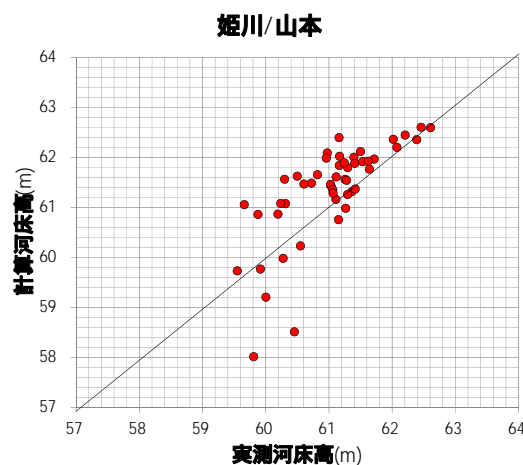


図-4 実測河床高と計算河床高の比較

いた洪水流量自動観測手法の一考察，土木学会河川技術論文集，第 16 巻，pp53-58，2010.

2) A. Yorozuya et al: Automatic water discharge measurement for mountainous areas, 5th International Conference on Flood Management, September 27-29, 2011, Tokyo, abstract in Conference USB Flash memory.

3) 藤田一郎ら，河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築，水工学論文集，第 55 巻，pp1177-1182，2011.

4) 萬矢敦啓ら：高速流における ADCP 観測のための橋上操作艇に関する提案，土木学会河川技術論文集，第 16 巻，pp59-64，2010.

5) 萬矢敦啓ら，実河川における掃流砂量の計測手法に関する一提案，水工学論文集，第 55 巻，pp1171-1176，2011.

6) 竹林洋史，江頭進治：自己形成流路の形成過程と形成水理条件，土木学会論文集 No.677/II-55，pp.75-86，2001.

7) Howard H. Chang: Fluvial Processes in River Engineering, Krieger Publishing Company, ISBN 1-57524-212-5, 1992

8) 例えば山本晃一：構造沖積河川学，山海堂，ISBN 4-381-01736-6，2004

9) A. Yorozuya et al. Water Discharge Measurements with ADCP in High Speed Flow with High Sediment Concentration, 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, pp.21 - 24, Sept 2014
10) Engelund, F.: Closure to "Hydraulic Resistance of Alluvial Streams," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, No. HY-4, pp. 287-296, 1967

11) 岸力，黒木幹男：移動床流れ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.1-23，1972

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萬矢 敦啓 (YOROZUYA, Atsuhiko)

国立研究開発法人 土木研究所 研究員

研究者番号：00314740

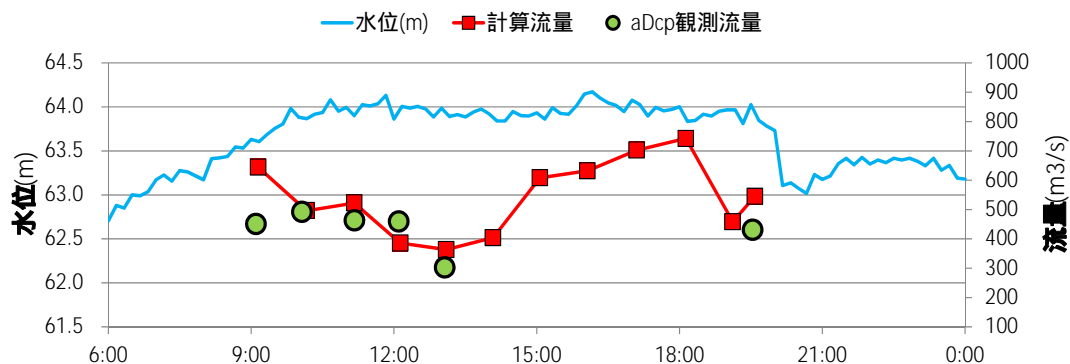


図-5 計算流量と aDcp で観測した流量の比較