

# 水面情報を用いた有効掃流力の算定方法

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～平 30

担当チーム：水文チーム

研究担当者：山本 晶、萬矢敦啓、小関博司

## 【要旨】

本研究課題は土砂水理学の基本的な水理量である有効掃流力の算定方法に関して検討している。掃流力は流水抵抗として説明すると容易で、掃流力は表面抵抗分と形状抵抗分に分けることができ、その分類において有効掃流力は掃流力の表面抵抗分である。本課題は流水抵抗の代表例である岸・黒木が提案した手法を、実河川における最新の計測技術を用いた観測結果を用いて評価した。ここでは  $m$  の値を河床材料の粒度分布に応じて変化させることで同式の実河川での適用性が実証された。また同式を用いて表面情報のみを用いた具体的な有効掃流力の算定方法とまた同手法の活用方法を概説した。

キーワード：水面情報、有効掃流力、流水抵抗、小規模河床波、ADCP

## 1. はじめに

河川水による川底へ働く外力は、掃流砂量及び浮遊砂を含めた流砂量、小規模河床波及びそれに起因する河床粗度係数、河床変動に影響を及ぼす。外力の算定方法として最も簡単な手法は重力のつり合いから換算された方法であり次式により与えられる。

$$\tau_b = \rho u_*^2, u_* = \sqrt{ghi} \quad (1)$$

ここでは、 $\tau_b$ ：平均河床せん断力、 $u_*$ ：摩擦速度、 $\rho$ ：水の密度、 $g$ ：重力加速度、 $h$ ：水深、 $i$ ：勾配である。この式で算定された河床せん断力は流況が一次的であり、勾配が局所的に変化しないときなど有効である。また後述の河床せん断力との違いを明確にするために、ここでは後述の小規模河床波の一波長間で平均した値として示すために平均河床せん断力としている。

川底はせん断力に応じて異なる波長・波高の波が発

生し、これらの一つとして小規模河床波と分類されている<sup>1)</sup>。このような波が発生する場合、川底の局地的な形状により外力が分布する。例えば図-1 は小規模河床波の一つである砂堆 I を模擬した河床に三次元の乱流解析の代表である NaysCUBE で計算を実施した結果の一つである。図-1 は小規模河床波一波長分の河床形状、計算された水位、圧力、せん断力の分布を示す。圧力、せん断力は川底に対してそれぞれ直角及び平行に働く応力でこれらは流れ場から算定されている。ここで計算された河床せん断力は河床波の凹部では極端に少なく、凸部で最大値を持つことがわかる。

河床せん断力が働いた結果として直接的に関連するものが掃流砂量である。例えば図-2 は小規模河床波が発生した河道において Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)を用いて計測した結果である<sup>2)</sup>。ここで

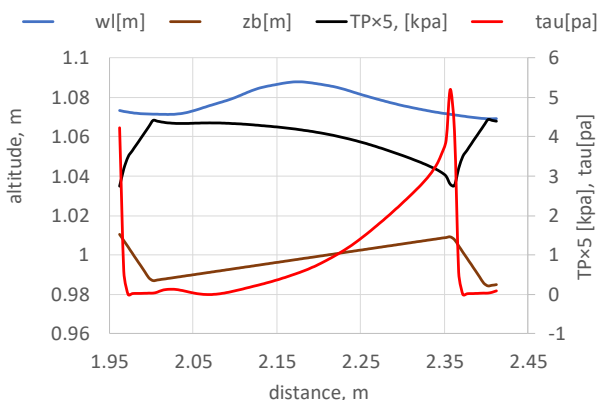


図-1：数値計算から得られた結果の一例[水位(WL)、河床高(Zb)、全圧力(TP)、河床せん断力(tau)]

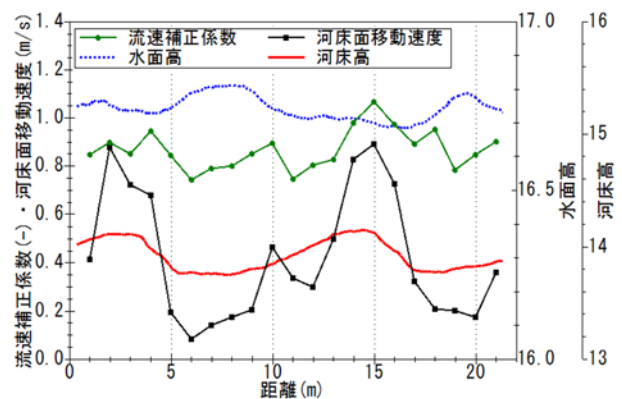


図-2：ADCP 観測から得られた結果の一例（流速補正係数、河床面移動速度、水面高、河床高）<sup>2)</sup>

表-1 各地点の諸元

観測地点	観測期間	観測手法	使用したaDcp	データ数	平均勾配	d <sub>50</sub> (mm)	平均R/d	最大Fr	平均Fr	補足
姫川/山本地点	2013年8月23日 2013年9月16日 2013年10月16日	横断観測	WorkHorse ADCP	50	1/110 (河床勾配)	60 (平成22年河床材料調査より)	43	1.04	0.74	<ul style="list-style-type: none"> <li>左岸側に広く植生が繁茂するため、流心のデータのみ使用した。</li> <li>洪水中に水位計が流出したため、河床勾配<sup>17)</sup>を代用。</li> <li>aDcpによる流速観測に不具合が生じたため、電波式流速計(RYUKAN)から得た表面流速に、一般的な流速補正係数である0.85を乗じて平均流速を得た。</li> <li>当該地点の観測の詳細は工藤ら<sup>18)</sup>を参考されたい。</li> </ul>
千代田実験水路	2015年6月25日	縦断観測	RiverPro ADCP	45	1/500	16 (通水後の河床材料調査より)	123	0.64	0.57	<ul style="list-style-type: none"> <li>片道縦断の平均データを使用。</li> <li>水路内の5箇所水位計から水面勾配を得た。</li> <li>当該地点の観測の詳細はKoseki et al.<sup>19)</sup>を参考されたい。</li> </ul>
信濃川/臼井橋地点	2013年6月19日 2013年7月13日 2013年7月30日 2013年8月1日 2014年7月9日	横断観測	WorkHorse ADCP	58	1/5,400	0.6 (平成23年河床材料調査より)	8,627	0.20	0.17	<ul style="list-style-type: none"> <li>断面平均データを使用した。</li> <li>観測地点上下流に設置された6箇所水位計から水面勾配を得た。</li> </ul>

は流速補正係数、河床面移動速度、水面高、河床高を示す。流速補正係数は表面流速と平均流速の比で、対数則が成立するような例えば平坦河床であれば0.85程度の数字となる。河床波の凹部分で最小値を取り、凸部分では最大値を取ることがわかる。河床面移動速度は河床せん断力に比例するが、この分布は概ね図-1が示すものに近い。またここでは示さないが河床面移動速度と掃流砂量も比例関係にある。これは江頭らが提案した式<sup>3)</sup>によるものであるが、その検証は小関ら(2017)<sup>4)</sup>を参照されたい。

河床せん断力は流水抵抗を用いて説明することができる。τ<sub>b</sub>を河床材料を用いて無次元化すると下記に示す式となる。

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

τ<sub>\*</sub>：無次元化された河床せん断力又は無次元掃流力で全抵抗、τ'<sub>\*</sub>：表面抵抗分、τ''<sub>\*</sub>：形状抵抗分となる。図-1で示す河床せん断力はここでいう表面抵抗として扱われ、前述のように掃流砂量に直接的に寄与する。これを有効掃流力と呼ぶ。一方で図-1が示す圧力分布は形状抵抗として扱われる。この形状抵抗は河床波一波長として考えると河床粗度の増加に大きく寄与するものの、局所的な掃流力には影響を与えない。すなわちτ'<sub>\*</sub>を正しく評価することが、掃流砂量を代表とした土砂水理学的に重要な水理量を検討する上で重要となる。

本課題は、岸・黒木が提案した流水抵抗<sup>5)</sup>を最新の計測技術を用いて実河川で計測した結果を用いて評価するものである。この結果を用いて、河川の表面情報を用いた有効掃流力の算定方法と流水抵抗を用いた河川管理の適用事例を紹介する。

## 2. 研究方法

### 2.1 ADCP等を用いた計測と用いた観測データ

流水抵抗を分析するために必要な水理量は平均流速、水深、勾配、河床材料の粒径である。平均流速及び水深はADCPの観測結果を採用することが最も仮定が少なく有効となる。一方で勾配は水面勾配として、当該地点の上下流に設置されている複数の水位計から算定した。河床材料の粒径は河床材料調査の結果よりd<sub>50</sub>を採用している。また用いた計測データは表-1に示す通りである。ADCPを用いた計測手法の詳細は本研究チームが作成したマニュアルを参照されたい<sup>6)</sup>。

### 2.2 流水抵抗の分析

流水抵抗を算定する上で、図-2ではADCPを用いた直接的な手法を示唆した。この手法はτ'<sub>\*</sub>を求めることは可能であるが、τ''<sub>\*</sub>を算定することは簡単ではない。これを直接算出するためには小規模河床波の波高及び波長、凹部近辺の詳細な流況を得る必要がある。一方で、τ<sub>\*</sub> - τ'<sub>\*</sub>関係を分析することで小規模河床波を直接計測せずに流水抵抗を調べることができる。ここでτ<sub>\*</sub>とτ'<sub>\*</sub>は以下の通りである。

$$\tau_* = \frac{RI}{sd} \quad (3)$$

$$\tau'_* = \frac{R'I}{sd} \quad (4)$$

ここでR：径深、ただしここでは近似的に水深として扱う。I：勾配、d：粒径、s：河床材料の水中比重のことここでここでは1.65を用いる。R'：平坦河床見合いの径深で、以下に示す通り流速に関係する水理量である。

$$\frac{U}{\sqrt{gR'I}} = 8.5 - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{R'}{k_s} \quad (5)$$

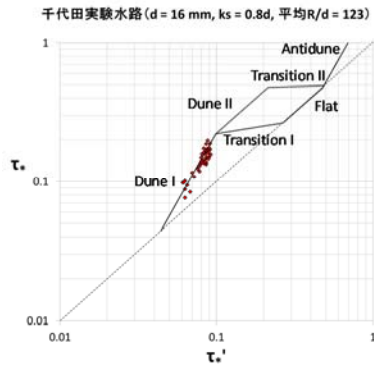


図-3 千代田実験水路の流水抵抗

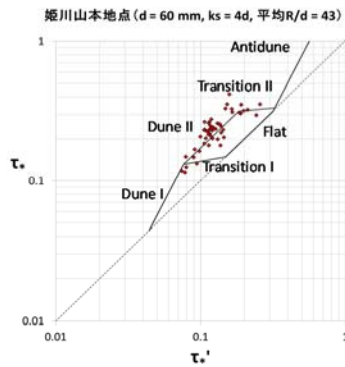


図-4 姫川/山本地点の流水抵抗

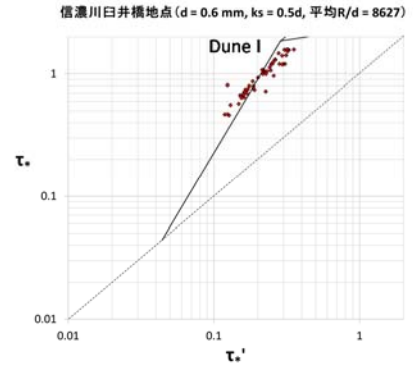


図-5 信濃川/臼井橋地点の流水抵抗

ここで、 $U$ ：平均流速、 $\kappa$ ：カルマン係数でここでは0.4を用いる。 $k_s$ ：相当粗度である。 $k_s$ は粒径の数倍( $md$ )とされ、 $m$ は様々な値が報告されており、例えば芦田<sup>7)</sup>は平均粒径の0.5~4.0倍の範囲で変化すると報告している。

### 2.3 研究結果

図-3、図-4は千代田実験水路及び姫川/山本地点における流水抵抗の分析結果を示す。なお、図中には各実線に対応する河床形態を示し、破線は $\tau_* = \tau_*'$ を表す。これは $\tau_*'' = 0$ 、すなわち形状抵抗が無く平坦河床であることを意味する。千代田実験水路については、観測データがDune Iの範囲で岸・黒木が提案したものと良く整合する。姫川については、Dune IIに沿って分布するデータと、Transition IIに沿って分布するデータがある。すなわち、これら2地点においては、Dune I、Dune II、Transition IIいずれの範囲においても、岸・黒木の $\tau_* - \tau_*'$ 関係は観測データを正確に予測できており、特に、姫川でプロットが水平に並ぶこと、つまり抵抗の急激な減少は河床形態が遷移河床に達したためと解釈できる。なお、姫川はデータが比較的ばらつく傾向がある。当該地点では電波式流速計から得た表面流速に0.85を乗じて平均流速としているため、流速補正係数の与え方がばらつきの一因と考えられる。

図-5は信濃川/臼井橋地点における $\tau_* - \tau_*'$ 関係である。観測データは岸・黒木の $\tau_* - \tau_*'$ 関係に沿って分布しており、同関係は当該地点の抵抗変化を説明できると考える。しかしながら、岸・黒木の $\tau_* - \tau_*'$ 関係と観測データの傾きが若干異なるようにも見受けられる。臼井橋地点と既存の水路実験における水理条件の違いについて、岸・黒木の $\tau_* - \tau_*'$ 関係は、水路実験データをR/dについて50、100、500、1,000に分類して導出された上で、R/dが最大3,500程度の現地観測による

表-2 各地点の粒径とmの値

	d10	d60	d90	均等係数 (d60/d10)	同定されたmの値
臼井橋	0.3 mm	0.6 mm	0.8 mm	2	0.5
千代田	2.5 mm	20 mm	50 mm	8	0.8
姫川	2.0 mm	100 mm	300 mm	50	4.0

データ群の流水抵抗を説明できることが示された。一方、臼井橋地点の平均R/dは約8,600と非常に大きい。これは岸・黒木の $\tau_* - \tau_*'$ 関係の適用範囲を示唆するものと考えられる。

ここで、図-3~図-5の3地点において $k_s = md$ におけるmの値は、岸・黒木の $\tau_* - \tau_*'$ 関係に整合するように調整して与えた。表-2は3地点の粒径とmの値についてまとめたものである。mの値は芦田<sup>7)</sup>が示した0.5~4.0の範囲にあることが確認できる。また、mと均等係数は比例関係にあることがわかる。均等係数は粒度の良さを表すことを踏まえて考察すると、均等係数が大きい場合は大粒径が比較的多く存在し、それが相当粗度を大きくする可能性があると考えられる。一方、均等係数が小さい場合は $d_{50}$ よりも大きな粒径が比較的少ないため、mの値が小さく同定されると考えられる。なお、表-2には参考として $d_{90}$ の値も掲載した。 $d_{90}$ を $k_s$ と関連付ける研究例<sup>8)</sup>もあり、実験水路よりも粒度条件がさらに複雑と考えられる実河川の $k_s$ と粒径の関係については更なる精査が必要である。

### 4. 水面情報を用いた有効掃流力の算定方法

ここでいう水面情報とは、電波式や画像解析等の非接触型流速計で河川水の表面流速を計測、複数の水位計を用いた水面勾配を計測するものであり、ADCP等の手法を用いることなく、洪水時に水面から得られる情報のみを用いて有効掃流力を算定するという意味である。また3章で示したように実河川における計測結

果から、岸・黒木が提案した式の適用性を確認することができた。これらを用いて次の手順に従い有効掃流力を算定することができる。ここでは特に DuneI 及び DuneII に限定した場合とする。

- 1) 河床材料調査による  $d_{50}$  及び  $m$  の決定
- 2) 平均流速の算定：ここでは非接触型流速計を用いた表面流速の計測結果から算定する。図-1 及び図-2 が示すように小規模河床波が発生している場合は河川水表面に凹凸が発生している。凸部近傍の流速補正係数も 0.85 に近く、代表的な流速を示していることから、この近傍の流速を計測する。
- 3) 水面勾配の計測：このような計測を実施する上で、河床波を意識した計測が望ましい。例えば近年では SfM を用いた手法<sup>9)</sup>やレーザを用いた手法がある。このような手法を用いて数波長分の水位を計測することが可能であれば、それぞれの河床波の凹部近傍を計測することで正しい水面勾配を計測することができる。
- 4)  $\tau'_*$  の算定：1), 2), 3) で測定した水理量と式(5)から  $R'$  を算定し、式(4)から  $\tau'_*$  を求める。ここで算定された  $\tau'_*$  が有効掃流力であるが、これが掃流砂量や浮遊砂の巻き上げに関連して土砂水理学上で最も重要な水理量の一つである。

本課題は有効掃流力の算定であるが、ここからさらに議論を進める。

- 5)  $\tau_*$  の算定：4) で求めた  $\tau'_*$ 、 $R/d$  から  $\tau_*$  を算定するが、ここでは  $R'$  と  $R$  を用いた繰り返し計算が必要になる。それらの式となる。ここで岸、黒木が提案している式で DuneI の場合は

$$\tau'_* = 0.21\tau_*^{1/2}$$

DuneII の場合は

$$\tau'_* = 1.49\left(\frac{R}{d}\right)^{-1/4}\tau_*$$

となる。

- 6)  $R$  の算定：5) を求めるプロセスで  $R$  が算定される。これは水深に他ならない。

最後に本手法をまとめると、1), 2), 3) で計測して水理量から有効掃流力及び水深が算定できることが理解できる。

## 5. 今後の課題

この手法に関しては以下の点に注意する必要がある。浮遊砂卓越河川においては、河床材料の代表粒径が  $200\mu\text{m}$  程度、水深が  $20\text{m}$  程度となり  $R/d$  が岸・黒木が提案している式の適用範囲外となる。このような場

合、工藤ら(2017)はそのような条件における流水抵抗の式を提案している<sup>10)</sup>。また Gul ら(2018)は浮遊砂卓越河川において、同様の無次元掃流力を示す二つの領域において全く異なる河床波が存在することを報告している<sup>11)</sup>。また小関ら(2018)は掃流砂卓越河川においても浮遊砂が大量に投入された場合、河床波の凹部に浮遊砂が堆積することで形状抵抗分が少なくなり、それにより粗度が減少し水位が大きく低下することがあることを報告している<sup>12)</sup>。国内の多くの河川は掃流砂卓越河川であるが、当該地点の上流で土石流や斜面崩壊のような大規模な土砂供給が発生した場合は注意が必要となる。

## 参考文献

- 1) 例えば水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会、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 210 号、pp.65-91、1973 年 2 月
- 2) 橋田隆史、萬矢敦啓、小関博司、吉川世子子、岡田将治、工藤俊：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, I\_535-I\_540, 2017.2
- 3) 江頭進治・芦田和男・高濱淳一郎・田野中新：連続体モデルに基づく流砂量式の誘導、水工学論文集、第 35 巻、土木学会、pp.441-446 (1991)。
- 4) 小関博司、萬矢敦啓、工藤俊、橋田隆史、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, 2017.2
- 5) 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) 土木研究所水工研究グループ水文チーム、流量観測の高度化マニュアル Ver1.1、[https://www.pwri.go.jp/team/hydro\\_eng/manual.htm](https://www.pwri.go.jp/team/hydro_eng/manual.htm), 2016.6
- 7) 芦田和男：河道の設計法(4)-河川の粗度について-、土木技術資料、1-7, 1959。
- 8) Chang, H. H.: Fluvial Processes in River Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- 9) 安田晃昭、萬矢敦啓、小関博司、安田浩保：カメラ同期制御装置を用いた近接写真測量による水面形状の計測、河川技術論文集、pp.213-218, 2019
- 10) 工藤俊、萬矢敦啓、小関博司、笛田俊治、中津川誠：実河川における流水抵抗の分析、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.73, No.4, I\_769-I\_774, 2017.2
- 11) Ahmad Ali GUL, Atsuhiko YOROZUYA, Hiroshi KOSEKI, Shinji EGASHIRA and Shoji OKADA, "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.

- 12) Hiroshi KOSEKI, Atsuhiko YOROZUYA, "A Study on Flow Resistances in High Suspended Sediment Concentration", 15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, 2018. 6