

安定した砂礫河川低水路の 無次元掃流力について

ON THE DIMENSIONLESS CRITICAL TRACTIVE FORCE FOR STABLE LOW-WATER CHANNEL OF GRAVEL AND SAND BED ALLUVIAL RIVERS

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²・和田 浩輔³・伊藤 嘉徳⁴
野口 聡介⁵・安武 環⁵・永谷 恵一⁶

Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA, Kosuke WADA, Yoshinori ITO,
Sosuke NOGUCHI, Tamaki YASUTAKE and Keichi NAGATANI

¹フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²正会員 博士(工学) 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系(同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻(同上)

⁴非会員 国土交通省九州地方整備局 河川部水災害予報センター
(〒812-0013 福岡市博多区博多駅東2-10-7)

⁵非会員 国土交通省九州地方整備局 遠賀川河川事務所(〒822-0013 直方市溝堀1-1-1)

⁶非会員 国土交通省九州地方整備局 筑後川河川事務所(〒830-8567 久留米市高野1-2-1)

This study is concerned with the dimensionless tractive force τ_{*S} for stable low-water channel of gravel and sand bed alluvial rivers. A non-dimensional parameter α contained in the τ_{*S} -relation, that has been obtained theoretically by the author, is examined with use of existing data of natural Japanese and overseas rivers as well as three Japanese A-class rivers in Kyushu, so that such relationship as $\alpha=K\Gamma^{1/2}$ is identified and the value of coefficient K is simultaneously estimated. Then, the obtained τ_{*S} -relation compares with τ_{*S} for the above mentioned field data, and the validity of the τ_{*S} -relation is confirmed. In addition, the stability of low-water channel of the Onga River after the flood in 2012, when maximum past flood has occurred, is examined by means of the τ_{*S} -relation, so that river sections required close attention for river managements in the Onga River are identified.

Key Words : dimensionless tractive force, stable channel, gravel and sand bed alluvial rivers

1. はじめに

これまでの河道計画は流下能力確保を主体になされてきたが、今日では河積確保だけではなく、河道の維持や経済的設計にとって必要不可欠な河道の安定性を備えた合理的な計画・設計が求められている。

河川には、流域の地質特性、流量や供給土砂(質と量)の変動といった自然的条件、河川改修などの人為的改変に適合して河道特性(平面、縦断、横断)を調整し、自ら河道を形成する自己形成メカニズムがあるが、わが国の河川の多くは、護岸によって川幅が規定され、平面形もほぼ固定された状態にあるため、自己形成メカニズムは主に縦断特性と川幅以外の横断特性に表れることになる。

経年的に安定した状態にある河道の縦断特性がセグメントであり、 h/d_R や B/d_R などの横断的に平均された横断特性が河道の平均スケールである。河道形成流量を所与の条件とすれば、セグメントと平均スケールは河床勾配、河床材料の代表粒径、河床の状態(河床波)を含む抵抗則などを介してつながっており、したがって前述した合理的な計画・設計においては各セグメントにおいて安定した状態にある河道の平均スケールと無次元掃流力が重要となる。

安定した河道の平均スケールを得る方法には、経験的な方法(レジーム則)^{1,2)}、次元解析より支配パラメータを決め、国内外の実河川や室内実験資料に基づく方法³⁾、安定した河道の河床の無次元掃流力と等流理論とを組み合わせる方法^{4,5)}、半理論的な方法⁶⁾がある。ま

た安定した河道の無次元掃流力を得る方法には、経験的な方法⁴⁾、理論的な方法⁵⁾、半理論的な方法⁶⁾などがある。

筆者は前報⁷⁾において、レジーム則を満たす条件と等流理論を組み合わせることで河道の平均スケールを求め、さらにその関係を上記の方法で得られた河道の平均スケールとを関係づけることで安定した低水路の無次元掃流力が得られることを示した。

本研究は、河積確保と河道の安定性の両要素を判断する指標として、安定した低水路の無次元掃流力が重要であるとの観点から、国内の河川に関する山本の資料⁸⁾、九州の3つの一級河川(遠賀川、緑川、白川)の資料(以下「九州3河川の資料」という)、Parkerがまとめた海外の河川の資料(以下「海外河川の資料」という)⁹⁾の3資料に基づき、データ数の関係から前報⁷⁾において課題として残っていたレジーム則を満たす条件と、その条件を用いて得られる安定した無次元掃流力について検討を加えるとともに、得られた無次元掃流力の関係を遠賀川に適用し、2012年7月九州北部豪雨災害時の出水前後における無次元掃流力の変化とその原因について考察したものである。

2. 無次元量と用いた資料

移動床流れの状態量は次の変数に規定される。

$$f_1(U, h, B, I, d_R, w_0, \rho, \rho_s, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

ここに、 U : 断面平均流速、 h : 平均水深、 B : 川幅、 I : エネルギー勾配(あるいは河床勾配)、 d_R : 河床材料の代表粒径、 w_0 : 粒子の沈降速度、 ρ : 水の密度、 ρ_s : 粒子の密度、 μ : 粘性係数、 g : 重力加速度である。

次元解析より次の無次元量が得られる。

$$f_2(\tau_*, Re_*, h/d_R, B/d_R, u_* / w_0, Fr, I) = 0 \quad (2)$$

ここに、 τ_* : 無次元掃流力($u_*^2/(sgd_R)$)、 Re_* : 粒子レイノルズ数($u_* d_R / \nu$)、 h/d_R : 水深粒径比、 B/d_R : 川幅粒径比、 u_* / w_0 : 浮遊パラメータ、 u_* : 摩擦速度($(\tau/\rho)^{1/2}$)、 τ : 掃流力($=\rho ghI$)、 Fr : フルード数($U/(gh)^{1/2}$)、 s : 粒子の水中比重($\rho_s/\rho - 1$)、 ν : 動粘性係数(μ/ρ)である。

式(2)において、安定した低水路の平均スケールや無次元掃流力 τ_* は Re_* の影響をほとんど受けないこと、 u_* / w_0 は τ_* と同様な物理的意味を持つ無次元パラメータであること、 τ_* は $\tau_* = (I/s)(h/d_R)$ と表わせること、 Fr は $u_* = (ghI)^{1/2}$ と流速係数 $\phi = U/u_*$ を用いると、 $Fr = \phi^{1/2}$ のように書けること、 ϕ は $\phi = Q/(gd_R^5)^{1/2} (B/d_R)^{-1} (h/d_R)^{-3/2} (I/s)^{-1/2}$ と表せるので、 $\phi = f(Q/(gd_R^5)^{1/2}, B/d_R, h/d_R, I/s)$ であることを考慮すれば、式(2)は式(3)で表される。

$$f_3(h/d_R, B/d_R, Q/\sqrt{gd_R^5}, s/I) = 0 \quad (3)$$

一方、河岸部を無視した低水路を対象として、抵抗則

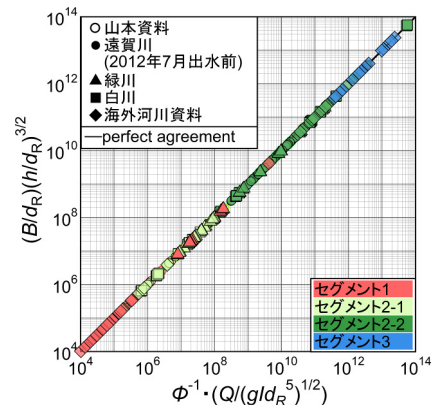


図-1 用いた資料の確認

として ϕ を用いれば、等流理論($Q=AU$, $\tau=\rho ghI$, 抵抗則)より、水深粒径比 h/d_R と川幅粒径比 B/d_R を含む関係が式(4)のように得られる。 ϕ が $(Q/(gd_R^5)^{1/2}, B/d_R, h/d_R, I/s)$ に規定されることを考慮すれば、式(3)と整合していることが確認できる。ここに、 Q : 河道形成流量(低水路満杯流量あるいは平均年最大流量)、 A : 河積である。

$$(B/d_R)(h/d_R)^{3/2} = \phi^{-1} \cdot (Q/\sqrt{gd_R^5}) \quad (4)$$

図-1は、本研究で用いた資料と式(4)の関係を調べたものである。全資料がこの関係を満足していることが確認できる。これは、平均水深 h が $h = (Q/(\phi B(gI)^{1/2}))^{3/2}$ から算定されているためである。なお、九州3河川の資料については、河道が経年的に安定していると判断された箇所であっても、各セグメントで取るべき d_R の範囲から外れた箇所、洗掘箇所、湾曲が大きい箇所、堰の直下、堰湛水域のデータは除外した。海外河川の資料については河道特性が不明なため、上記だけを除いて用いた。なお、 d_R は山本と九州3河川では d_{60} 、海外の河川では d_{50} である。

3. 安定した低水路の無次元掃流力 τ_{*S}

(1) レジーム則を満たす条件と安定した低水路河床の無次元掃流力 τ_{*S}

筆者は、式(4)中の h/d_R と B/d_R を含むもう一つの関係としてレジーム則を満たす条件を式(5)のように求め、これと式(4)を組み合わせることで、低水路の平均スケール($h/d_R, B/d_R, A/d_R^2, B/h$)を導くとともに、前述したような方法で、安定した低水路の無次元掃流力 τ_{*S} に関する関係を式(7)のように得た⁷⁾。

$$\alpha = (h/d_R)(B/d_R)^{-2/3} \quad (5)$$

$$h/d_R = \alpha^3 \cdot (B/h)^2 \quad (6)$$

$$\tau_{*S} = \alpha^{1/2} \cdot (s/I)^{-1} (\phi^{-1} Q/\sqrt{gd_R^5})^{1/3} \quad (7)$$

式(5)のレジーム則を満たす条件は、次のような考え方で得られたものである。まず無次元パラメータ α を

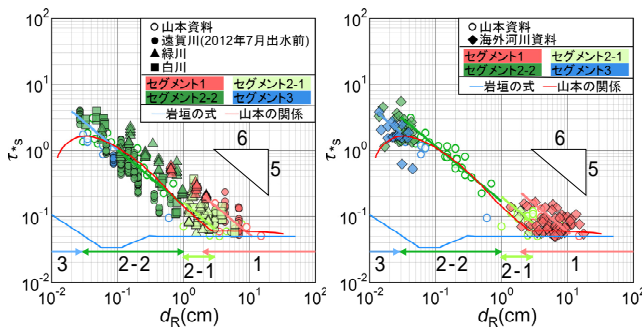


図-2 $\tau_s \sim d_R$ の関係 (左: 九州3河川, 右: 海外の河川)

$\alpha = (h/d_R)(B/d_R)^p$ のように定義し、 $B \sim Q^m$ のように決められるレジーム則を満たす条件を考え、 $m=0.5$ 前後の値を取ることが広く知られていること^{1),2)}、線形安定理論を用いた安定川幅の解析からも $m=0.5$ が妥当とされていること¹⁰⁾ を踏まえて $m=0.5$ と仮定し、これを満足するように $p=2/3$ のように定めたものである。一方、 $h \sim Q^n$ の関係については $n=0.3 \sim 0.4$ 程度の値を取ることがレジーム則より知られており^{1),2)}、 $p=2/3$ では $n=1/3$ となるので、式(5)は B と h のいずれについてもレジーム則と整合した条件となっている。式(5)は式(6)のように書け、次元解析と実験資料より得られた砂州の領域区分¹¹⁾ で用いられた関係と同一となっていることから、式(5)が水みちの形成条件、つまり B/h を規定する条件となっていると考えた。

図-2は前述した3資料を用いて τ_s と d_R の関係を調べたものである。図中の赤い実線は山本の経験則⁴⁾ である。九州3河川の資料のセグメント2のデータは山本の経験則のまわりに分布しているものの、散らばりが大きいことがわかる。またセグメント1と3については九州3河川と海外の河川の資料のいずれも山本の経験則から大きく外れることが確認できる。

前報⁷⁾でも触れたように、式(7)は $\tau_s \sim d_R^{-5/6}$ なる関係があることを示しており、山本の関係は各セグメントに対して成立する $\tau_s \sim d_R^{-5/6}$ の関係を連ねたものとなっていると考えられる(図-2の各セグメントを示す色付き線参照)。山本の経験則がよい近似となっているのは、式(7)に含まれる各パラメータのべき乗からわかるようにその他の無次元量に比して d_R が τ_s に対して支配的な物理量となっており、また各セグメントにおいて d_R と τ_s が取り得る範囲が限定されているためである。

(2) レジーム則を満たす条件 と河床勾配/およびセグメントとの関係

τ_s の評価では、式(7)に含まれる無次元パラメータ α が重要となるが、次元解析から得られる式(3)と等流理論から得られる式(4)に含まれる無次元パラメータを勘案すると、 α は h に依存すると考えられる。

そこで、山本の資料⁹⁾ を基本資料として、山本の資料と九州3河川の資料、山本の資料と海外河川の資料⁹⁾ について α と h の関係について調べたものが図-3である。

同図より、 α と h には強い相関が認められ、また α がセ

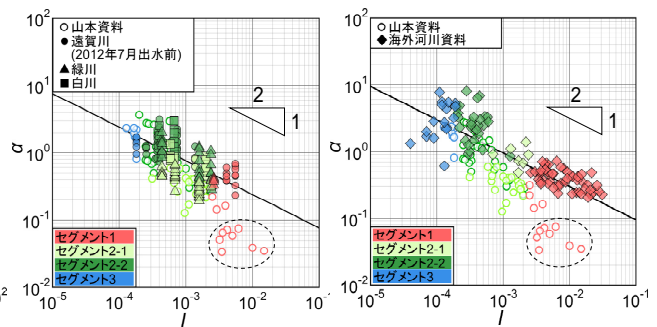


図-3 α と h の関係 (左: 九州3河川, 右: 海外の河川)

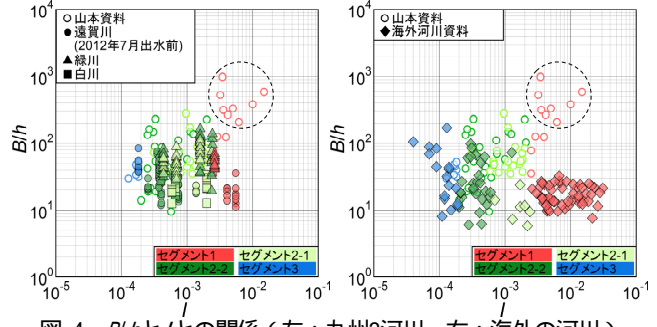


図-4 B/h と h の関係 (左: 九州3河川, 右: 海外の河川)

グメントを反映したパラメータとなっていることが各セグメントのデータの分布から確認できる。それと同時に、山本の資料のセグメント1のデータのうち、破線で囲った8データは九州3河川と海外河川のセグメント1のデータと傾向が大きく異なることも見て取れる。

これらの傾向の異なる8データは、黒部川(2点)、常願寺川、手取川、安倍川、大井川、日野川、富士川のもので、いずれも急流河川のデータである。他のデータと傾向が異なるのは、図-4からわかるように B/h が数百の複列砂州～うろこ状砂州の領域のデータとなっており、またこれらの8データの無次元掃流力 τ_s は無次元限界掃流力 τ_c と同じかそれに極めて近い値となっていることから、平均年最大流量が必ずしも河道形成流量とはなっていない可能性が推察される。

そこで、これら傾向の異なる8データを除いて α と h の関係を推定すれば、図-3で示したように国内外の河川を問わず、式(8)で表すことができる。ここに、 K : セグメントに依存する係数である。各セグメントにおける α 値にはかなり幅があるが、この理由には河道横断測量や河床材料の調査が必要十分に密でないことなどが考えられる。

$$\alpha = KI^{-1/2} \quad (8)$$

(3) セグメントグループと K の評価

図-5は、 h/d_R と h の関係を示したものである。これより、 h/d_R は理論的に得られる $h/d_R \sim I^{-1}$ なる関係^{4),7)} に従っていること、いずれの資料もセグメント1と2-1のグループ、セグメント2-2と3のグループの2つのグループに大きく分かれることが確認できる。そこで以下では、前者のグループをセグメントグループA、後者をセグメントグ

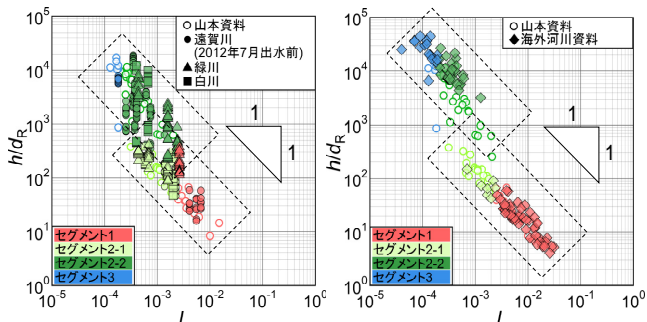


図-5 $h/d_R \sim I$ の関係(左：九州3河川，右：海外の河川)

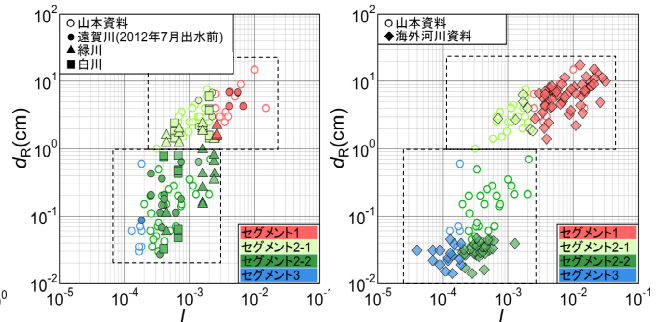


図-6 $d_R \sim I$ の関係(左：九州3河川，右：海外の河川)

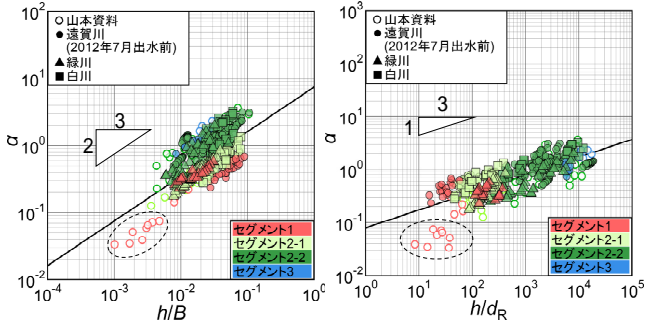


図-7 九州3河川(左： $\sim h/B$ の関係，右： $\sim h/d_R$ の関係)

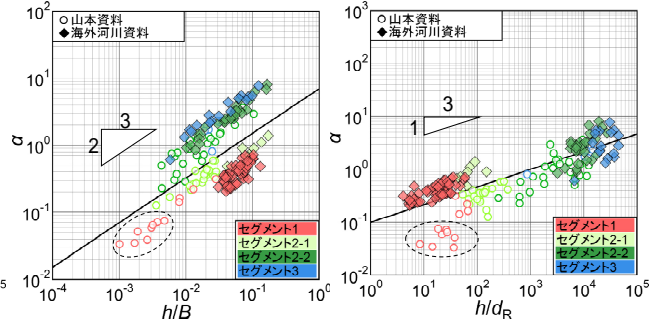


図-8 海外の河川(左： $\sim h/B$ の関係，右： $\sim h/d_R$ の関係)

ループBのように呼ぶこととする。

図-6は d_R と I との関係を示したものである。図中の黒の破線で示したように、セグメント2-1と2-2を区別する代表粒径($d_R=1\text{cm}$)を概ね境として各セグメントグループの河床材料が大きく異なることが確認できる。一方、広く知られているように、河床材料が掃流で動くのがセグメント1、掃流～浮遊で動くのがセグメント2、浮遊でしか動かないのがセグメント3であり、またセグメント2では掃流が支配的なのがセグメント2-1、浮遊が支配的なのがセグメント2-2である。したがって、各セグメントグループの代表粒径の違いは土砂の流送形態を反映していると考えられる。なお、国内の河川ではセグメント2-2と3の d_R は海外の河川に比べて粒径の幅が広く、また大きな粒径となっている。これはわが国の河川では河道の自己形成メカニズムが河川改修や横断工作物など、人為的改変の影響を強く受けているためであると考えられる。

図-7と図-8は、式(5)を $\alpha=(h/d_R)^{1/3}(h/B)^{2/3}$ のように書き直して、九州3河川の資料と海外河川の資料について $\alpha-h/B$ の関係と $\alpha-h/d_R$ の関係についてそれぞれを調べたものである。これからも山本のセグメント1の8データは h/B と h/d_R のいずれも他のデータと大きく傾向が異なっていることが確認できる。さらに重要な点は、 $\alpha-h/B$ の関係では α が大きい方から、 $\alpha-h/d_R$ の関係では h/d_R の大きい方から順にデータがセグメント3、2-2、2-1、1となっており、さらに $\alpha-h/B$ の関係において α の上下方向に2つのセグメントグループAとBとに大きく分かれていることである。このことから、式(5)は各セグメントにおける B/h と h/d_R の関係を規定する条件となっていると考えられる。またこのことは式(6)が砂州の領域区分を規定するパラメータとなっていることの裏付けともなり得る。

表-1 各資料と各河川のK値

	セグメントグループA (セグメント1, 2-1)	セグメントグループB (セグメント2-2, 3)
	Kの平均値	
山本資料	0.011	0.026
遠賀川(出水前)	0.029	0.025
緑川	0.012	0.027
白川	0.023	0.044
山本+九州3河川	0.016	0.027
海外河川資料	0.033	0.040
山本+海外河川資料	0.019	0.036
山本+九州3河川 +海外河川資料	0.018	0.033

(4) 安定した低水路の無次元掃流力 τ_{s0} の予測

式(7)による τ_{s0} の予測結果と $\tau = \rho g h I$ から算定された実測結果を次の3つの評価法で比較した。各資料と各河川を区別し、式(8)のK値として各セグメントの平均値を用いたもの(評価法①)、山本と九州3河川の資料について各資料および各河川を区別し、表-1に示したセグメントグループのK値を用いたもの(評価法②)、各資料および各河川を区別せず、セグメントグループのK値を用いたもの(評価法③)。

図-9、図-10はそれぞれ山本と九州3河川の資料、山本と海外河川の資料について評価法①と②を比較したものである。図-2と比較すればわかるように、データの散らばりが大幅に減少していることが確認できる。なお、最も予測精度が高いのは評価法②であるが、実用上の理由と紙面の都合から評価法③の比較図は割愛した。

(5) 安定した低水路の無次元掃流力 τ_{s0} の実用式

式(7)において、 ϕ は平均水深 h がわかっている場合には簡単に求めることができるが⁽¹²⁾、式(7)は河道形成流量 Q

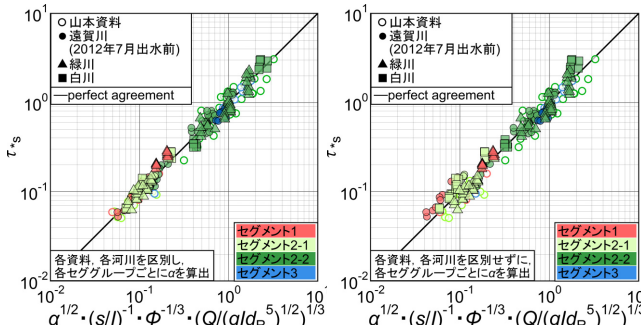


図-9 山本・九州3河川の資料に対する τ_s の予測式の検証

(左: 評価法 , 右: 評価法)

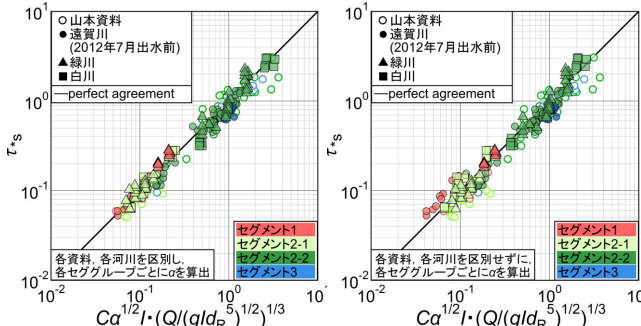


図-11 山本・九州3河川の資料に対する τ_s の実用式の検証

(左: 評価法 , 右: 評価法)

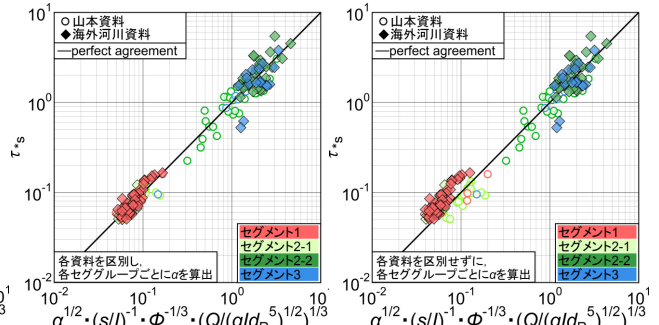


図-10 山本・海外河川の資料に対する τ_s の予測式の検証

(左: 評価法 , 右: 評価法)

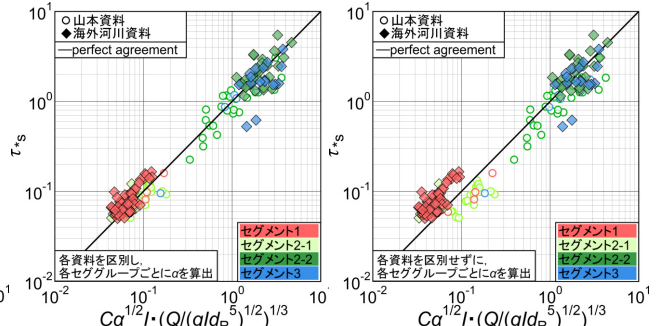


図-12 山本・海外河川の資料に対する τ_s の実用式の検証

(左: 評価法 , 右: 評価法)

で表されているので、この場合はトライアンドエラーより h を求め、 ϕ を推定する必要がある。この理由から河床波せん断抵抗を考慮した岸・黒木の抵抗則¹³⁾(砂堆： $\phi=2.4(h/d_R)^{1/6} \cdot \tau_*^{-1/3}$ ，砂堆： $\phi=8.9$ ，平坦： $\phi=6.9(h/d_R)^{1/6}$)を用いて式(7)を書き換えると、砂堆～平坦河床の範囲において $\pm 5\%$ 程度の誤差で式(9)のように近似できる。ただし、遷移ではこの精度で近似できない。

$$\tau_{s*} = C \alpha^{1/2} I \cdot (Q / \sqrt{g d_R^5})^{1/3} \quad (9)$$

ここで、係数 C は河床波の状態で異なり、岸・黒木の抵抗則の係数と $s=1.65$ を用いれば、砂堆では 0.45 ，砂堆では 0.29 ，平坦では 0.32 程度となる。

なお、用いた資料の各セグメントでの Fr 数は、山本と九州3河川の資料ではセグメント1 ($Fr=0.57\sim0.80$)，セグメント2-1 ($0.18\sim0.67$)，セグメント2-2 ($0.13\sim0.57$)，セグメント3 ($0.10\sim0.32$) であり、海外河川の資料ではセグメント1 ($0.26\sim0.95$)，セグメント2-1 ($0.24\sim0.39$)，セグメント2-2 ($0.14\sim0.58$)，セグメント3 ($0.13\sim0.19$) であり、ほぼ全データが Lower Regime ($Fr=0.8\sim1.0$ 以下) のものとなっている。

図-11，図-12は式(9)において全資料を用いて推定した $C=0.28$ および式(8)に示したセグメントグループの K 値を用いて得られる τ_{s*} の予測結果とデータを比較したものである。これから確認できるように、式(7)より若干予測精度が低下するものの、それぞれ図-9，図-10で見たものと大きな違いはないことがわかる。

4. 遠賀川における出水前後の τ_s の変化

遠賀川では1954～2002年に記録された最大の年最大流量(基準地点で評価)より大きな流量が2003～2012年に3度発生しており、既往最大流量となったのが2012年7月九州北部豪雨災害時のものである。以下では、2002年と2012年(以下「出水前後」という)に実施された縦横断測量と河床材料調査に基づき、 τ_{s*} を目安として河道の変化について考察する。

図-13は、 τ_{s*} の変化を本川縦断方向に調べたものである。図中の τ_{s*} と τ_{s*} は、それぞれ $\tau = \rho g h I$ から算定された出水前後の実測値である。式(7)と式(9)による予測値は河道縦断方向の τ_{s*} の変化を良好に表しており、また両式による予測値の違いはわずかである。

出水前後での τ_{s*} の変化については次が確認できる。

- ・一本木堰近くの35km地点，白門堰付近の37km地点および43.8km地点の光代堰より上流付近では、出水による局所洗掘(図中の τ_{s*})の進行がみられ、 d_R が $1/2\sim1/4$ 程度小さくなっており、出水後の τ_{s*} が τ_{s*} より大きくなっている。
 - ・彦山川合流点下流の15.8～17.6kmにかけては、2012年7月出水が彦山川流域を中心の降雨であったために、出水後の d_R が3倍程度大きくなっており、出水後の τ_{s*} が小さくなっている。なお、図-13中の青線からわかるように、本川と同規模の流量である。
 - ・12.6～15.6kmの区間で河床勾配が大きくなっているのは、出水後に実施された河道掘削による。その影響により12.6～15.6kmの区間では τ_{s*} が若干大きくなっている。
- 以上のように出水による洗掘の進行がみられる箇所

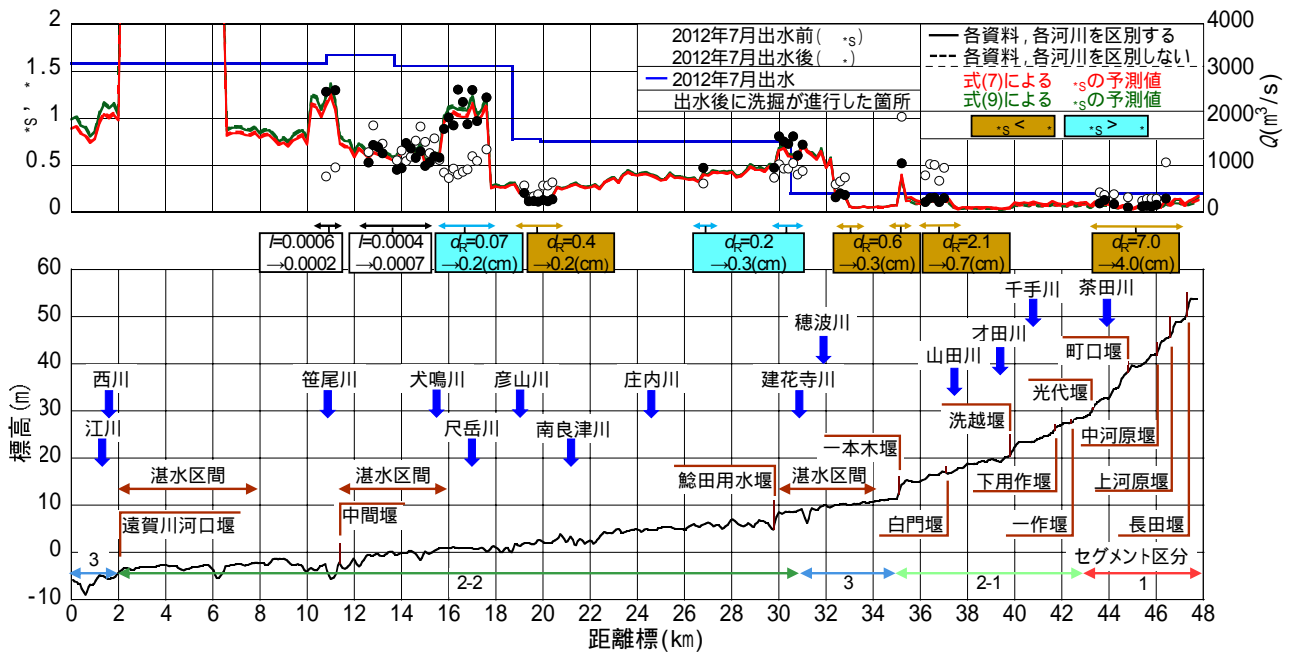


図-13 遠賀川縦断面図

は d_R が小さくなっており、また彦山川の合流点下流では出水時の同川への流入土砂や河道の堆積土砂の本川への流入により約2kmにわたって d_R が大きくなっているために τ_{s0} からの変化がみられる。これら以外で τ_{s0} が変化した箇所は人為的な改変の影響によるものである。

5. まとめ

本研究より以下のような知見が得られた。

- ・河積確保と河道の安定性の両要素を判断する指標として安定した低水路の無次元掃流力 τ_{s0} が式(7)あるいは式(9)のように表せ、 α 値は式(8)と表-1のK値、式(9)の係数CはC=0.28で与えられることを示した。
- ・遠賀川を対象として、以上のようにして得られた τ_{s0} と2012年の河道と d_R から得られる τ_{s0} の違いの理由について検討し、 τ_{s0} を用いて河道管理上注意を要する箇所を特定できることを示した。

謝辞：本学学部4年生池田隼人君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、Leopold, L.B and Miller, J.P: Ephemeral streams; hydraulic factors and their relation to the drainage net, *U.S.G.S. Prof.Paper*, p.252-A, I-36, 1956.
- 2) 例えば、Leopold, L.B and Maddock, T: The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, *U.S.G.S. Prof. Paper*, (252), I-56 1953.
- 3) 例えば、福岡捷二：温暖化に対する河川の適応技術のあり

方 —治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて、土木学会論文集, Vol.66, No.4, pp.471-489, 2010.

- 4) 山本晃一：沖積河川 -構造と動態-, 技法堂出版, p.587, 2010.
- 5) 例えば、池田駿介, Gary Parker, 千代田将明, 木村善孝：直線礫床河川の動的安定横断形状とそのスケール, 土木学会論文集, 第375巻II-6, pp.117-126, 1986.
- 6) Julien, P.Y., and Wargadalam, J.: Alluvial Channel Geometry, Theory and Applications, *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, Vol.121, No.4, 1995.
- 7) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 和田浩輔：砂礫河川の平均スケールと動的平衡条件, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, I_1051-I_1056, 2014.
- 8) 山本晃一：河道特性論, 土木研究所資料, 第2662号, p.260, 1988.
- 9) Parker, G. : 1D SEDIMENT TRANSPORT MORPHODYNAMICS with applications to RIVERS AND TURBIDITY CURRENTS, http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm
- 10) 渡邊康玄, 早川 博, 清治真人：安定解析に基づく川幅の自律形成機構, 水工学論文集, 第53巻, pp.739-744, 2009.
- 11) 村本嘉雄, 藤田裕一郎：中規模河床形態に関する研究, 京大防災研究所年報, 第20号, B-2, pp.243-258, 1977.
- 12) 例えば、国土技術研究センター：河道計画検討の手引き, 山海堂, 2002.
- 13) 岸 力, 黒木幹男：移動床流における河床形状と流体抵抗 (), 北海道大学工学部研究報告, 第67号, pp.1-23, 1973.

(2014.9.30受付)