

遠賀川水系への安定砂礫床河道の横断形状と 無次元掃流力に関する関係式の適用

APPLICATION OF RELATIONSHIPS FOR CROSS-SECTION GEOMETRY
AND DIMENSIONLESS TRACTIVE FORCE OF
STABLE GRAVEL-SAND RIVERS TO THE ONGA RIVER

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²・池田 隼人³

古賀 満⁴・野口 聡介⁴・峰松 知裕⁴

Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA, Hayato IKEDA,
Mitsuru KOGA, Sosuke NOGUCHI, and Tomohiro MINEMATSU

¹フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 (〒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 遠賀川河川事務所(〒822-0013 直方市溝堀一丁目1-1)

This study is concerned with the non-dimensional relationships for the bank-full channel characteristics as well as dimensionless tractive force τ_{*s} for stable channels of gravel and sand bed alluvial rivers. The condition proposed by the author for stable channels, that satisfies rational regime relations, is verified with use of selected existing data of natural Japanese and overseas rivers, so that such relationship as $\tau_{*s} = (K^{3/2} \cdot (B/h))^2$ is identified and the value of K is estimated from these data. Then, the obtained relationships with the estimated K -value from selected existing data of Japanese and overseas natural rivers are tested against the Onga River in Kyushu. The relationships are found to well predict longitudinal changes of both channel characteristics and τ_{*s} of the Onga River.

Key Words : stable river width and depth, tractive force, gravel and sand bed alluvial rivers

1. はじめに

河川には流域の地形・地質特性、流量・供給土砂(量と質)の経年変動といった自然条件や、河川改修・ダム建設などの人為的改変に順応して自ら河道を形成する自己形成メカニズムがある。わが国の大多数の河川では、平面形はほぼ固定され、川幅も低水護岸で拘束された状態にあるため、自己形成メカニズムは主として縦断特性と砂州等の川幅以外の横断特性に表れることになる。

河道の縦断特性を評価・把握するための有効な考え方が、セグメント¹⁾である。セグメントは大小の出水や供給土砂の経年変化を受けて形成された河道の縦断特性をマクロ的に捉えた概念で、主に河床勾配と代表粒径を指標として、M, 1, 2および3の各セグメントに大きく縦断特性を区分するものである。なお、各セグメントはそれぞれ地理学分類の山地、扇状地、中間地およびデルタ地の各河道に対応する。

河道は前述した自然条件等の外的条件により縦横断的に変化し続けており、実際は縦断特性と横断特性は不可分な関係にあるが、セグメントの概念が成立するのは、外的条件に対する河道のレスポンスの速さが縦断特性と横断特性で異なるためである。すなわち、河床高は洪水等により局所的・短期的にかなり変化し得るが、セグメントスケールの河床勾配はよほど大きな外的インパクトがない限り、大きく変わることはない。その一方、川幅程度のスケールに支配される横断特性は局所的、短期的に変化しやすい。

この外的インパクトに対するレスポンスの速さは、河床材料についても当てはまる。すなわち、河床材料は豪雨時の法面崩壊等による土砂の流入、洪水時の河道の侵食と土砂の流送、さらには河道や流域特性が異なる支川の合流等により、局所的、短期的にかなり変わり得る。したがって、河床勾配はセグメントを判断する指標となり得るが、代表粒径は必ずしもそうとは言えない。

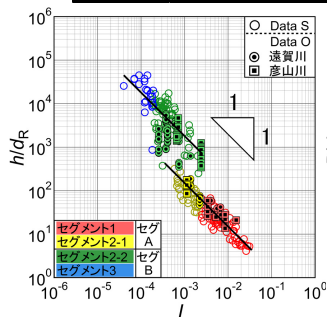
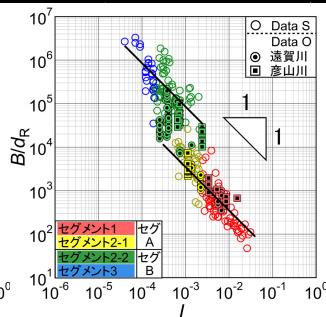
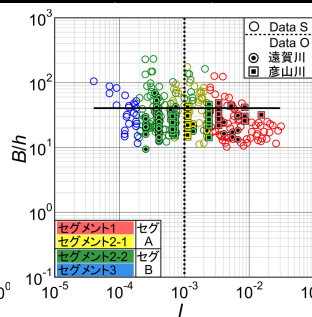
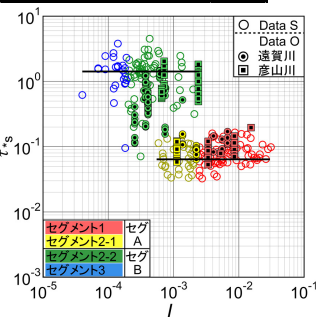
外的インパクトに対するレスポンスの速さが異なる縦

表-1 安定河道の式とパラメータ

安定河道の式	安定河道の式
$h/d_R = \tau_{*s} \cdot (s/I)$ (1)	$h/d_R = 1.1 K^{1/2} I^{-1/6} \cdot (\phi^{-1} Q / (g I d_R^{5/2}))^{1/3}$ (5)
$B/d_R = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-3/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q / (g I d_R^{5/2}))^{1/2}$ (2)	$B/d_R = 0.9 K^{-3/4} I^{1/4} \cdot (\phi^{-1} Q / (g I d_R^{5/2}))^{1/2}$ (6)
$A/d_R^2 = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-1/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q / (g I d_R^{5/2}))^{1/2}$ (3)	$A/d_R^2 = 1.0 K^{-1/4} I^{1/12} \cdot (\phi^{-1} Q / (g I d_R^{5/2}))^{5/6}$ (7)
$B/h = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-5/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q / (g I d_R^{5/2}))^{1/2}$ (4)	$B/h = 0.8 K^{-5/4} I^{5/12} \cdot (\phi^{-1} Q / (g I d_R^{5/2}))^{1/6}$ (8)
	$\tau_{*s} = 0.7 K^{1/2} I^{5/6} \cdot (\phi^{-1} Q / (g I d_R^{5/2}))^{1/3}$ (9)
ここに、 h : 平均水深(=A/B)、 A : 河積、 B : 川幅、 d_R : 河床材料の代表粒径、 Q : 河道形成流量、 I : 河床勾配、 ρ : 水の密度、 s : 粒子の水中比重(= $\rho_s/\rho-1$)、 g : 重力加速度、 τ_{*s} : 動的平衡状態にある無次元掃流力(= $u_{*s}^2/(sgd_R)$)、 ϕ : 流速係数(= U/u_*)、 U : 断面平均流速、 u_* : 摩擦速度(= $(\tau/\rho)^{1/2}$)、 τ : 河床せん断力	

表-2 検討に用いた資料と水理量等

	資料名	Q (m ³ /s)	d_R (cm)	F_r 数	セグメント	Data
国内河川	遠賀・彦山川資料	低水路満杯	$d_{60}=0.027\sim6.91$	0.17~0.83	1/2-1/2-2/3	O
	山本資料(1988) ⁶⁾	平均年最大or低水路満杯	$d_{60}=0.03\sim15$	0.10~0.80	1/2-1/2-2/3	
海外河川	Parker資料 ⁷⁾	平均年最大or低水路満杯	$d_{50}=0.014\sim22.2$	0.13~0.95	M/1/2-1/2-2/3	
	Colby・Hembree(1955) ⁸⁾	日平均流量	$d_{15}=0.0175\sim0.023$	0.36~0.45	2-2	
	Simons・Albertson(1963) ⁹⁾	明記なし	$d_{50}=0.0067\sim0.0271$	0.13~0.18	2-2/3	
	Kellerhals(1967) ¹⁰⁾	2年確率	$d_{50}=2.01\sim8.23$	0.47~0.64	1	
	Bray(1979) ¹¹⁾	2年確率	$d_{50}=1.9\sim14.5$	0.17~0.76	1/2-1	
	Nakato(1989) ¹²⁾	低水路満杯	$d_{65}=0.036\sim0.99$	0.12~0.21	2-2/3	
						S

図-1 $h/d_R \sim I$ の関係図-2 $B/d_R \sim I$ の関係図-3 $B/h \sim I$ の関係図-4 $\tau_{*s} \sim I$ の関係

断特性と横断特性を結び付けているのが、縦横断特性である川幅水深比である。したがって、低水護岸によって川幅が拘束された河川では、河積ではなく川幅水深比が河道の縦横断特性に影響を及ぼし、川幅の設定が河道の経済的設計・維持管理や環境に配慮した川づくりと深く関係する。

筆者は、以上のような河道特性に及ぼす川幅水深比の重要性に鑑み、実河川の河道計画・管理に資する河川技術の観点から、安定砂礫床河川の横断形と無次元掃流力の予測に取り組んでいる^{2),3),4)}。本研究は、筆者が提案する“レジーム則を満たす条件”を用いた安定河道の横断形および動的平衡状態にある無次元掃流力に関する関係式を遠賀川水系(遠賀川、彦山川)に適用し、同条件と同関係式の有用性を実証したものである。

2. 安定河道の横断形スケールの関係式

(1) 安定河道の式の概要と用いた資料

a) 安定河道の式の概要

安定河道の条件として動的平衡状態にある無次元掃流力 τ_{*s} (= $u_{*s}^2/(sgd_R)$)を用いた関係式(以下「安定河道の式」という)と、筆者が提案する“レジーム則を満たす

条件”を用いた関係式(以下「安定河道の式」という)をまとめて表-1に示す。ここに、 h/d_R : 水深粒径比、 B/d_R : 川幅粒径比、 A/d_R^2 : 河積粒径比、 B/h : 川幅水深比である。安定河道の式、の詳細については前報^{2),3),4)}を参照願いたい。なお、以下では誤解が生じない範囲で安定河道の式、をそれぞれ式、のように略称する。

式では別途 τ_{*s} を定め与える必要があり、その定め方には経年的に安定した河道から学ば方法¹⁾と土砂水理の知見に基づく方法⁵⁾とがある。後者の方法はセグメント単位で土砂の輸送形態に違いがあることや、自然安定河道で重要となる流量や供給土砂の経年的な変動履歴の影響との関係が必ずしも明確でないなどの理由から、ここでは前者の方法で得られた山本の $\tau_{*s}=f(d_R)$ の経験則¹⁾を用いることとする。なお、式に用いる“レジーム則を満たす条件”については、後述する。

b) 用いた資料

本検討で用いた実河川資料とその水理量等を表-2にまとめて示す。このうちData Sは経年的に安定した状態にあると判断される国内外の自然安定河道、Data Oは遠賀川水系(遠賀川、彦山川)の安定河道区間の資料である。なお、Data Sの護岸の有無については、Nakato資料は護岸なしと確認されたが、Parker資料は確認できなかった

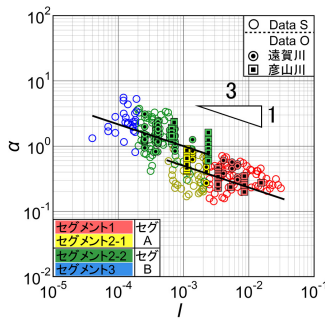


図-5 $\alpha \sim I$ の関係

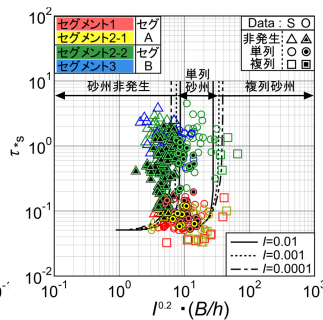


図-6 $\tau_s \sim I^{0.2} \cdot (B/h)$ の関係

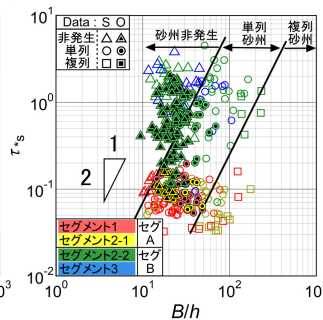


図-7 $\tau_s \sim B/h$ の関係

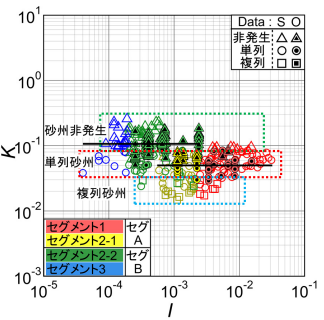


図-8 $K \sim I$ の関係

ためそのまま用いた．山本資料は少なくとも6データは2011～2014年の航空写真から低水護岸が確認されたが，国内河川に関する貴重なデータであることなどから，特性量の傾向が他資料と明らかに異なるセグメント1と2-1の黒部川等の9データ以外はそのまま用いた．Data Oについては，洗掘箇所，湾曲が大きな箇所，堰直下，堰湛水域，各セグメントで取るべき d_R の範囲から外れた箇所，大きな支川の合流点直下のデータは除外し，縦断，横断測量結果を基に河道が経年的に安定した区間をもって安定河道と判断した．

(2) セグメントグループとレジーム則を満たす条件

a) セグメントグループ

図-1～4は，セグメントの指標である河床勾配 I に対する h/d_R ， B/d_R ， B/h および τ_s の依存性を調べたものである．これより，いずれの特性量もセグメント1と2-1(セグメントグループA)，セグメント2-2と3(セグメントグループB)に大きく分かれることが確認される．図は割愛するが，このような傾向は A/d_R^2 ， d_R についても同様であった．

以上のように各特性量が大きく2グループに分かれるのは，セグメント1で掃流，2-1で掃流主体，2-2で浮遊主体の掃流・浮遊混在流，3で浮遊のように，各セグメントグループで土砂の流送形態が異なることによる．ただし， B/h については土砂の流送形態の違いから，図中に破線で示した $F=10^{-3}$ 程度でデータは2グループに分かれるものの，他の諸量とは異なり，各グループで I に対する傾向的な違いはない．なお，Data Oの遠賀川は全直轄区間の約70%がセグメント2(約60%が2-2)，彦山川は約50%がセグメント2(約35%が2-2)となっていることから，グループAとBの中間的なデータがやや多くなっている．

b) レジーム則を満たす条件

$$\alpha = (h/d_R)^{1/3} (h/B)^{2/3} \quad (10)$$

$$\alpha = K \cdot (I/s)^n \quad (11)$$

$$\tau_s = (K^{3/2} \cdot (B/h))^2 \quad (12)$$

式(10)に含まれる α は， τ_s の定義(式(1))とData Sより検証された関係に基づき定められる^{2),3),4)}．すなわち， α はせいぜい I/s に依存するパラメータと考えられることから，

式(11)のように表せると仮定でき，さらに式とData Sを用いると， $\alpha = K(I/s)^{-1/3}$ なる関係が得られる．ここに， K はセグメントグループ単位で定められる係数である．

図-5はData SとOについて $\alpha \sim I$ の関係を調べたものである．このように，グループ単位で $\alpha = K(I/s)^{-1/3}$ なる関係に従っていることがわかる．

さらに，式(10)に $\alpha = K(I/s)^{-1/3}$ と式(1)を用いれば，式(12)のように表すことができ，“レジーム則を満たす条件”が $\tau_s \sim B/h$ の関係を規定する条件となっていることが理解される．なお，図-3と図-4からわかるように， τ_s は各セグメントグループ， B/h は全セグメントについてlog-logスケールで1サイクル以上のばらつきがある．このため，式の予測結果も少なくとも τ_s と同程度の誤差を伴うことになる．一方，式で用いる K は $K = \tau_s^{1/3} \cdot (B/h)^{-2/3}$ であるので， τ_s によるばらつきが減少するだけでなく，この後述べるように B/h を介して自然安定河道が有する縦横断特性を式に反映させることができる．

(3) 安定河道と砂州との関係および K 値の推定

a) 安定河道と砂州との関係

図-6は，式(12)の“レジーム則を満たす条件”が砂州の発生領域を規定する関係^{13),14)}と同様となっていることを踏まえ，黒木・岸¹⁴⁾の砂州の領域区分を用いてData SとOについて調べたものである．さらにこの領域区分を踏まえて，式(12)の関係について調べたものが図-7である．このように，Data SとOは式(12)の関係に沿って単列砂州，その右側に複列砂州，左側に砂州非発生領域のように分布する．これは安定河道の横断形と砂州のいずれも横断特性(正確には縦横断特性)であるからに他ならない．併せて，同図は $\tau_s \sim B/h$ の関係がセグメントグループと深く関係していることも示している．

b) K 値の推定

図-8は，式(12)の係数 K と I との関係を調べたものである．これより，Data SとOのいずれも K 値が約0.1以上で砂州非発生，約0.1～0.03の範囲で単列砂州，約0.03以下で複列砂州のように，砂州の発生形態別に明確に分かれることが確認される．また， K 値はセグメントグループ単位で明確に分かれ，グループ単位の K 値が I に依存しないことも確認される．これは，式(10)と $\alpha = K(I/s)^{-1/3}$ からわ

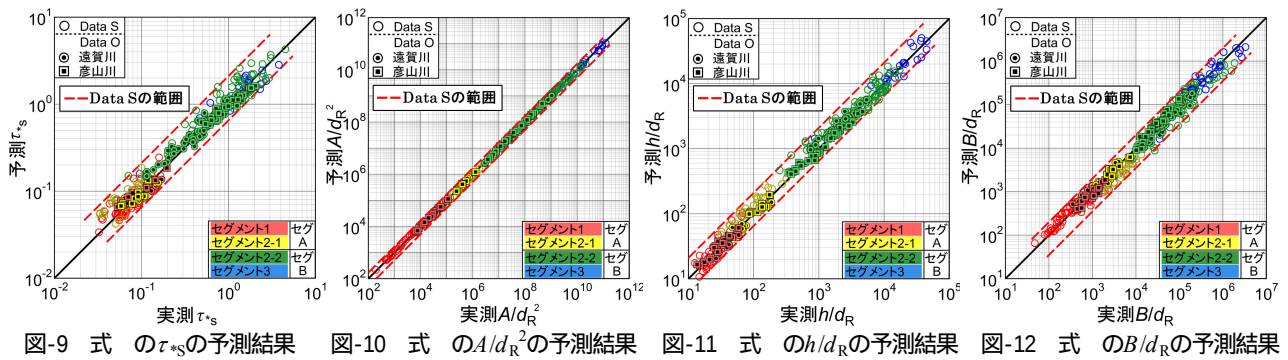


図-9 式 τ_{s0} の予測結果 図-10 式 A/d_R^2 の予測結果 図-11 式 h/d_R の予測結果 図-12 式 B/d_R の予測結果

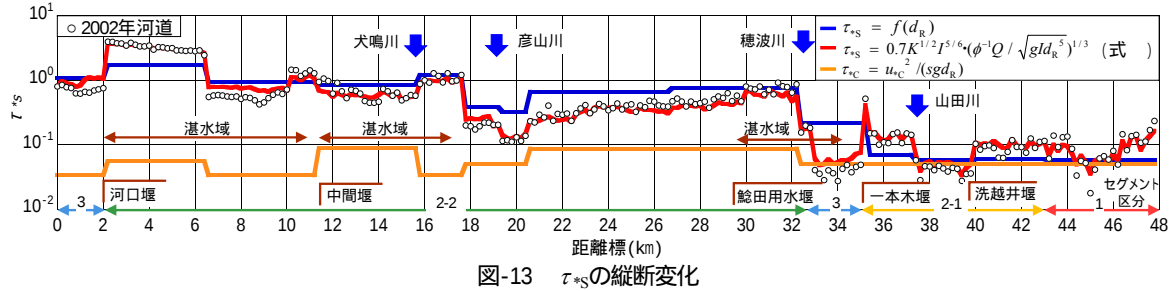


図-13 τ_{s0} の縦断変化

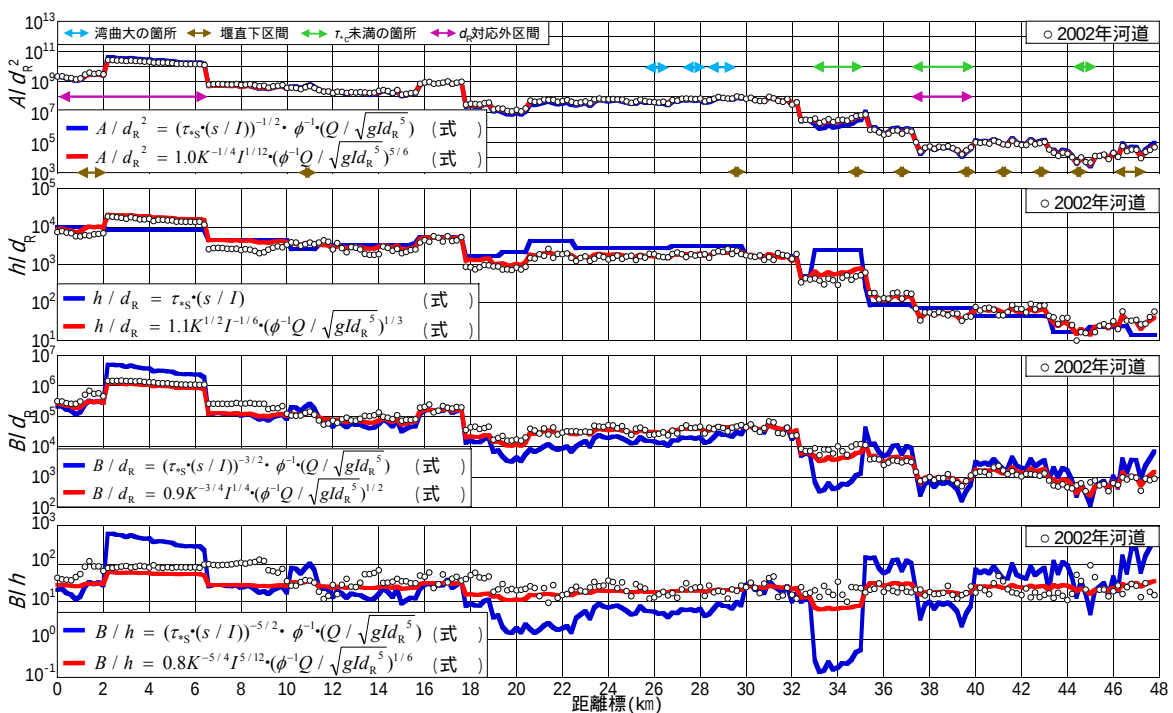


図-14 横断形 (A/d_R^2 , h/d_R , B/d_R , B/h) の縦断変化

かるように、 K が縦断特性と縦横断特性を関係付けるパラメータとなっているためである。したがって、同図からわかるように、セグメントグループBが砂州非発生～単列砂州、グループAが単列砂州～複列砂州のように、セグメントグループと横断形には対応関係があるものの、両者は必ずしも一致しない。なお、図中の黒の実線は、Data Sより得られた各グループの K 値の平均値(K^S 値)を示したもので、その値はグループBで約0.1、Aで約0.05であり⁴⁾、Data Oの各グループの K 値も K^S 値とほぼ同じになっている。

3. 安定河道の式の遠賀川水系への適用

(1) 式 の検証

図-9～12は、 τ_{s0} および横断形(A/d_R^2 , h/d_R , B/d_R)の実測値と式 に各セグメントグループの K^S 値を用いた予測値を比較したものである。図中の赤の破線はData Sの散らばりの範囲を示し、各特性量がこの範囲内に収まっていれば安定河道と判断できる目安である。これより、式が全セグメントにわたって τ_{s0} と横断形を良好に予測できることがわかる。併せてData Oが安定河道の資料となっていることもあらためて確認される。

(2) τ_{s0} および横断形の縦断変化

図-13、図-14は、それぞれ2012年7月の九州豪雨災害以前の河道を対象として、 $\tau_{s0}=f(d_R)$ の経験則¹⁾より得られ

る τ_{S} と式(式(9))より得られる τ_{S} の縦断变化, 各 τ_{S} を式, 式に適用したときの横断形の縦断变化の予測値と実測値を比較して示したものである。ここで, 図中の○は定期横断測量, 縦断測量および河床材料調査より得られた横断形(2002年8月), 縦断形(2002年8月)および d_{R} (2003年3月)の実測値, 青の実線は $\tau_{\text{S}}=f(d_{\text{R}})$ とこれを式の τ_{S} に適用したときの横断形, 赤の実線は式に各セグメントグループの K^{S} を用いたときの予測結果である。

前述したように, 遠賀川直轄区間の約70%, 彦山川の約50%がセグメント2となっていることから, K^{S} 値に各セグメントグループの K^{S} の中間値である $K^{\text{S}}=0.075$ を用いた検討も行ったが, 改善が認められる区間とそうでない区間があり, 全川で見れば大きな違いは認められなかった。このため, ここではグループ平均値(Bで約0.1, Aで約0.05)を用いている。

a) τ_{S} の縦断变化

図-13中のオレンジ色の実線は, d_{R} を単一粒径と見なしたときの無次元限界掃流力 $\tau_{\text{c}}(=u_{\text{c}}^2/(sgd_{\text{R}}))$ を示したものである。 τ_{c} の実測値に着目すると, 33~35k, 38~40kおよび45k前後では τ_{c} 未満の区間となっている。このうち, 33~35kは一本木堰下流, 38~40kは洗越井堰の直下となっており, いずれも土砂の堆積により水路幅が狭くなっている箇所である。45k前後は一部の短い湛水区間を除き堰が連続する区間となっており, 土砂の堆積により水路幅がかなり狭くなっている箇所である。以上のように, τ_{c} 未満の区間は堰下流で土砂の堆積が生じている区間となっている。

次に τ_{S} の実測値に着目すると, 6.5k付近, 17.5k付近, 32~33k, 35.2k, 37.5kにおいて τ_{S} の急減が見られる。このうち, 6.5k付近については, 2~10kが遠賀川河口堰の湛水区間となっていることに加え, 当該区間の低水路幅は9kを境に大きく異なり, 9k上流では幅が急に狭くなっている箇所である。また, 河床材料調査地点が5kと9kであるために, 2~6.5kでは湛水域として河床材料が捉えられており, d_{R} が小さくなっている。このため0~6.5k付近ではセグメントを規定する l と d_{R} が異なっている。一方, 6.5~11kでは9k上流での水路幅の影響を受けて d_{R} が大きくなっている。以上のように, 6.5k付近の急減は河道特性を踏まえない河床材料調査地点の選定に起因している。17.5k付近については, 17.5kは中間堰湛水区間の上流端にあたっており, 河床材料の調査地点が湛水域の16k, 湛水域の上流の18kであるために, 6.5k付近と同様な理由から, 16~17.5kの d_{R} が小さくなっていることによる。32~33kについては, 32kよりやや上流が穂波川の合流点となっており, 当該区間の川幅がやや狭くなっていることによる。35.2kについては, 同地点は一本木堰の上流端に位置するが, d_{R} はその下流区間(33~35k)で調査したものとなっているためである。37.5k付近は山田川の合流による。

τ_{S} が急増している箇所は, 10k, 16k付近, 20.5k,

35.2k, 40kである。このうち, 10kについては上記した6.5k付近と同じ理由である。16k付近については犬鳴川の合流による。20.5kについては19kの少し下流が彦山川の合流点で, その上流の水路幅が狭い20kが直近の河床材料調査点であることによる。35.2kおよび40kについては, τ_{c} 未満の箇所と同じ理由である。なお, 彦山川合流点~20kの区間は2005年に断面が台形状で両岸が1枚法面の緩傾斜河岸に改修されている。

τ_{S} と τ_{c} の実測値に着目すると, τ_{S} と τ_{c} の d_{R} は同一なので, 全体的に類似した傾向を示している。しかし, 例えば16~17.5kのように τ_{c} が小さくなっている一方で τ_{S} が大きくなっている区間や, 12~15kのようにその逆の関係になっている区間が認められる。これは, τ_{S} と τ_{c} では d_{R} に対する依存性が異なるために, τ_{S} と τ_{c} に単純な比例関係が成立しないためである。

τ_{S} の予測値と実測値に着目すると, $\tau_{\text{S}}=f(d_{\text{R}})$ の経験則では実測値の傾向を予測できないことが確認される。これは $\tau_{\text{S}}=f(d_{\text{R}})$ が限定された資料に基づく経験則であることも関係しているが, 主な理由は τ_{S} を規定する d_{R} 以外のパラメータ(l , Q)が考慮されていないためである⁴⁾。

一方, 式は τ_{S} の縦断变化を良好に予測している。ただし, 6~10k, 11.6~14k, 18~19k, 33~35kの各区間, および42k上流域で実測値と差異が見られる。ここで, 6~10kは河口堰の湛水域の上流側, 11.6~14kは犬鳴川の合流点直下で中間堰(約11.5k)の湛水域, 18~19kは彦山川合流点直下の各区間である。33~35kは一本木堰(約35k)の直下であると同時に33~34kは鯉田用水堰(約30k)の湛水域にあたっており, 一本木堰直下で河床高が階段状に低下し, 勾配が緩くなっているために, 33~35kは上流側のセグメント2-1と下流側の2-2に挟まれた形で局所的にセグメント3となっている区間である。42k上流域は堰が連続する区間にあたっている。

以上のように, 予測値と実測値に差異が見られる箇所は, いずれも湛水域, 規模が大きい支川合流点と堰の直下となっており, これらは先述したData Oで除外された箇所である。なお, 18~19kの彦山川合流点直下で差異が大きいのは, 彦山川上流の約50%はセグメント1, 残りの区間の大部分もセグメント2-1となっている一方で, 彦山川合流点から上流の遠賀川は最上流部のみがセグメント1で, 残りの約50%はセグメント2-2となっており, また両川はほぼ同流量で合流するため, 合流点の直下の遠賀川では d_{R} が大きくなっていることによる。一本木堰の直下も粗粒化により, 18~19kと同様に実測値と比べて予測値は大きくなっている。

以上の比較結果とは別に, τ_{S} の実測値で触れたように, 河床材料調査が必ずしも河道特性を踏まえた地点となっておらず, また河道変化が激しい箇所での調査間隔も必要十分に密ではないことも式の予測誤差を生じる要因となっている。

b) 横断形(A/d_{R}^2 , h/d_{R} , B/d_{R} , B/h)の縦断变化

図-14の A/d_R^2 については、式 の方がやや予測精度に優れるものの、式 と に顕著な違いは認められない。この理由については後述する。

図-14の h/d_R 、 B/d_R については、両図からわかるように、式 では τ_{cs} の予測精度が低い区間で、当然ながら予測精度が低下している。一方、式 は先に考察したように、横断構造物や大きな支川の合流によって安定河道となり得ない一部の区間を除き、実測値を良好に予測している。

式 の h/d_R と B/d_R の予測値を比較すると、過大評価と過小評価している区間が逆になっていることがわかる。これは式 では h/d_R は $\tau_{cs}=(I/s)(h/d_R)$ 、 B/d_R は等流理論($Q=AU$ 、 $\tau=\rho ghI$ 、抵抗則)より得られる $(B/d_R)(h/d_R)^{3/2}=\phi^{-1}Q/(gId_R^{5/2})^{1/2}$ から算定され、 B/d_R が h/d_R に従属して定まらなっているからである。 A/d_R^2 ではこの過大、過小評価が相殺されるために、以上で見たようにそれなりの結果になる。一方、式 では、先に論じたように“レジーム則を満たす条件”が τ_{cs} と B/h を規定する条件となっているために、そのような問題は生じていない。また、 ϕ は $\phi=Q/(A(g h I)^{1/2})$ より算定されており、一般に ϕ はセグメント1で小さく3で大きくなる傾向があるが、Data Sも当然そうっており、グループA、Bの平均値はそれぞれ9.5、13.0程度で妥当な値となっている。なお、遠賀川、彦山川ではセグメント1と3の区間が短いために、それぞれ10.0、15.5程度となっており、Data Sよりやや大きくなっている。

図-14の B/h については、 B/h の実測値が縦断方向にほとんど変化していないことが確認される。これは安定河道について経験的に良く知られた知見であるが、このようになるのは、図-1、図-2で見たようにグループ単位で $h/d_R \sim I^{-1}$ 、 $B/d_R \sim I^{-1}$ なる関係があるだけでなく、 h/d_R と B/d_R の各グループの間隔もほぼ同じになっているために、図-3のように B/h がセグメントグループとは無関係に I に対して独立となるためである。式 は前述した一部の除外区間を除き、そのような B/h の縦断特性も良好に予測しており、式 が河道の経済的設計等に配慮した川づくりの一つの目安になり得ることを示している。

4. まとめ

筆者が提案する“レジーム則を満たす条件”に基づく安定河道の式 を遠賀川水系(遠賀川、彦山川)に適用し、動的平衡状態にある無次元掃流力 τ_{cs} と無次元横断形(A/d_R^2 、 h/d_R 、 B/d_R 、 B/h)について以下を明らかにした。

同水系の安定河道区間における τ_{cs} と無次元横断形が、国内外の安定河道のものと大きな違いはないこと(図-9~12)。

式 が τ_{cs} と無次元横断形の縦断変化を良好に予測できること(図-13~14)。また予測誤差が大きな箇所は、堰湛水域、規模の大きい支川合流点や堰の

直下のように、河床材料や河道形状が自然安定河道と異なる一部の区間に限定されること。

謝辞：本学学部4年生富田泰貴君(現鹿島建設)の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 山本晃一：沖積河川 -構造と動態-，技法堂出版，p.587，2010。
- 2) 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。
- 3) 秋山壽一郎，重枝未玲，和田浩輔，伊藤嘉徳，野口聡介，安武 環，永谷恵一：安定した砂礫河川低水路の無次元掃流力について，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.71，No.4，I_1033-I_1038，2015。
- 4) 秋山壽一郎，重枝未玲，池田隼人，古賀 満，伊藤嘉徳，安武 環，永谷恵一：自然安定河道の特性に基づく砂礫床河川の横断形状と無次元掃流力の予測，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.72，No.4，I_727-I_732，2016。
- 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) 山本晃一：河道特性論，土木研究所資料，第2662号，p.260，1988。
- 7) Parker, G.: 1D SEDIMENT TRANSPORT MORPHODYNAMICS with applications to RIVERS AND TURBIDITY CURRENTS, http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm
- 8) Colby, B.R. and Hembree, C.H.: Computations of total sediment discharge Niobrara River near Cody, Nebraska, *U.S.G.S. Water Supply Paper*, No.1357, 1955。
- 9) Simons, D.B. and Albertson, M.L.: Uniform water conveyance channels in alluvial material, *Trans. ASCE*, Vol.128, pp.65-105, 1963。
- 10) Kellerhals, R.: Stable channels with gravel paved beds, *ASCE, J. WW Div.*, Vol.93, WW1, pp.63-84, 1967。
- 11) Bray, D. I.: Estimating average velocity in gravel-bed rivers, *ASCE, J. Hydraul. Div.*, Vol.105, HY9, pp.1103-1122, 1979。
- 12) Nakato, T.: Test of selected sediment-transport formulas, *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, Vol.116, No.3, pp.362-379, 1989。
- 13) 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。
- 14) 黒木幹男，岸 力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文集，第342号，pp.87-96，1984。

(2016.4.4受付)