

# 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

PREDICTIONS ON THE CROSS-SECTION AND DIMENSIONLESS  
TRACTIVE FORCE OF STABLE GRAVEL-SAND RIVERS

秋山 壽一郎<sup>1</sup>・重枝 未玲<sup>2</sup>・池田 隼人<sup>3</sup>  
古賀 満<sup>4</sup>・伊藤 嘉徳<sup>5</sup>・安武 環<sup>5</sup>・永谷 恵一<sup>6</sup>  
Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA, Hayato IKEDA,  
Mitsuru KOGA, Yoshinori ITO, Tamaki YASUTAKE and Keiichi NAGATANI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>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)

<sup>6</sup>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 non-dimensional relationships for the bank-full channel characteristics as well as dimensionless tractive force for stable channel 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  $\alpha=KT^{1/3}$  is identified and the value of  $K$  is estimated from these data. Then, the obtained non-dimensional relationships along with the estimated  $K$ -value are tested against existing data of Japanese and overseas natural rivers, laboratory experimental data as well as three natural Japanese A-class rivers in Kyushu. The relationships are found to well predict all these data.

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

## 1. はじめに

これまでの川づくりでは流下能力の観点から河積確保に主眼が置かれてきたが、これに加えて今日では河道の経済的設計や維持管理の観点から河道の安定性が求められている。

安定河道の問題は古くて新しい河川工学の課題である。古くは灌漑水路の安定設計の観点から水路形状と流量の関係を経験的に見いだそうとする、いわゆるレジーム論<sup>1)</sup>として取り扱われていたが、今日では土砂水理の知見と視点から水理学的に取り扱えるようになってきている。例えば、混合砂礫の土砂輸送メカニズム等を考慮して安定河道の問題を取り扱おうとする池田らの研究<sup>2)</sup>や、出水や供給土砂等の経年的な変動履歴を受けて形成されたのが実河道であるとの視点に立ち、経年的に安定した河道

から学ぶことで、その特性を把握・評価しようとする研究などがある。

後者のアプローチは、河川計画・管理に資する河川技術の観点に立ったものであり、その代表的な研究には、安定河道を規定している無次元掃流力 $\tau_{sS}$ (動的平衡条件)を $\tau_{sS}=f(d_R)$ なる関係として経験的に見出し、この関係を用いて、安定した低水路の横断形状を予測しようとする山本の研究<sup>3)</sup>、水路全断面および大規模洪水を対象として無次元水深と川幅を規定する関係式を求め、河道の断面形による川幅等のばらつきを考慮して無次元流量 $Q/(gId_R)^{5/2}$ の取り得る範囲を明らかにするとともに、そのような関係式(福岡の式)を目安として河床変動解析に基づき動的平衡状態にある河道形状を検討しようとする福岡の一連の研究<sup>4),5),6)</sup>、安定河道の $\tau_{sS}$ を規定しているパラメータを定めることの難しさに鑑み、安定した状態にある多くの国内外の実河川が前述したレジーム則を満足

表-1 検討に用いた資料と水量等

	資料名	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$d_r$ or $d$ (cm)	$Fr$ 数	セグメント	凡例	Data
国内河川	9) 山本資料(1988)	平均年最大or低水路満杯	$d_{60}=0.03\sim 15$	0.10~0.80	1/2-1/2-2/3	●	S or T
	九州3河川	低水路満杯	$d_{60}=0.027\sim 6.91$	0.17~0.83	1/2-1/2-2/3	○	T
海外河川	10) Parker資料	平均年最大or低水路満杯	$d_{50}=0.014\sim 22.2$	0.13~0.95	M/1/2-1/2-2/3	◆	S or T
	11) Colby・Hembree(1955)	日平均流量	$d_{15}=0.0175\sim 0.023$	0.36~0.45	2-2	□	
	12) Simons・Albertson(1963)	明記なし	$d_{50}=0.0067\sim 0.0271$	0.13~0.18	2-2/3	◇	
	13) Kellerhals(1967)	2年確率	$d_{50}=2.01\sim 8.23$	0.47~0.64	1/2-1	□	
	14) Bray(1979)	2年確率	$d_{50}=1.9\sim 14.5$	0.17~0.76	1/2-1	◇	
	15) Nakato(1989)	低水路満杯	$d_{65}=0.036\sim 0.99$	0.12~0.21	2-2/3	◆	
室内実験	16) Ikeda(1981)	水路満杯	$d=0.085, 0.13$	0.58~0.86	1/2-2	◀	E or T
	17) 福岡・山坂(1984)		$d_{50}=0.067$	0.55~0.56	1	▽	
	18) 仲井・池田(1984)		$d_{50}=0.074, d=0.1$	0.57~1.33	1	▶	
	2) 池田ら(1986)		$d_{50}=0.13$	0.39~0.66	1/2-2	▶	
	19) 長谷川ら(1987)		$d_{50}=0.01$	0.46~1.28	1/2-2	▼	
	20) Diplas(1990)		$d_{50}=0.19$	0.56~0.82	1	▶	

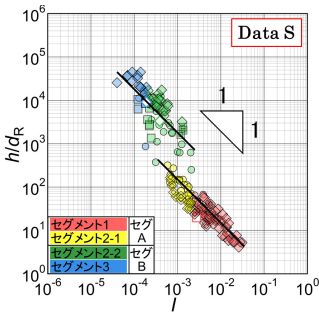


図-1  $h/d_r \sim l$ の関係

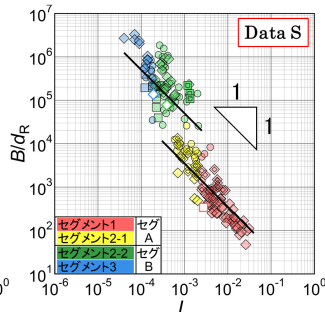


図-2  $B/d_r \sim l$ の関係

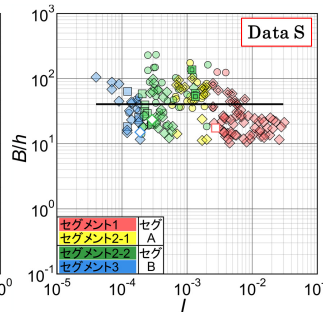


図-3  $B/h \sim l$ の関係

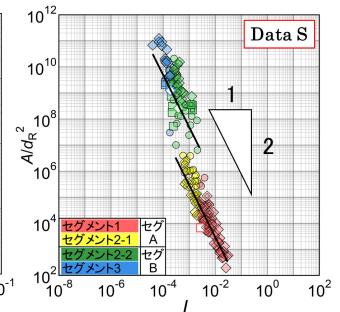


図-4  $A/d_r^2 \sim l$ の関係

していることに着目し、安定河道を規定する条件を“レジーム則を満たす条件”として定式化し、この関係を用いて安定河道の横断形状と $\tau_{cs}$ を予想しようとする秋山の研究<sup>7),8)</sup>などがある。

本研究は、前報<sup>7),8)</sup>をさらに発展させ、“レジーム則を満たす条件”が安定河道の縦横断特性を規定する条件となっていることを明らかにするとともに、厳選された自然安定河道のデータに基づき同条件に含まれる未定係数を定めた上で、同条件を用いた安定河道の横断形状と $\tau_{cs}$ に関する半理論式が、九州3河川を含む国内外の実河川のみならず、室内実験で得られた安定水路の実測値までも良好に予測できることを実証したものである。

## 2. 検討に用いた資料とセグメントグループ

### (1) 検討に用いた資料

表-1に本研究で用いた実河川資料と室内実験資料の水量等をまとめて示す。表からわかるように、大多数のデータがFroude数 $Fr=U/(gh)^{1/2}$ が0.8~1.0以下のLower Regimeのものとなっている。以下では、これらの資料をData T、Data SおよびData Eに分けて用いる。このうち、Data Sは経年的に安定した状態にあると判断あるいは推定されたDataで、自然安定河道の特性を検討・評価するためのものである。各Dataの定義は次のとおりである。

Data T：表-1の全資料から以下を除外したデータ

- ・水面勾配 $I_w$ を有する実験資料の $(I-I_w)/I$  5%のデータ
- ・山本, Parker, Kellerhalsの各資料の $B/h$  10のデータ

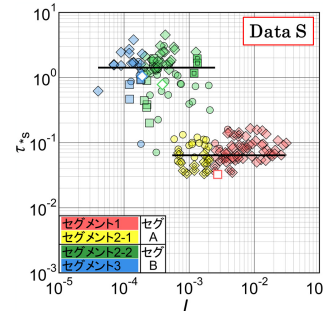


図-5  $\tau_{cs} \sim l$ の関係

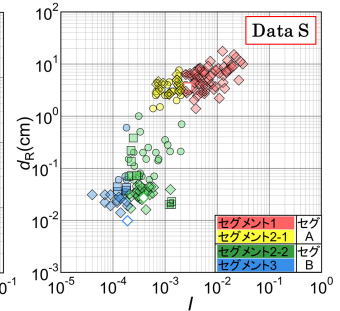


図-6  $d_r \sim l$ の関係

・限界掃流力未満のデータ(セグメント2-1については、データ数の関係からBrayのデータを $\tau_{c0}$  0.03としている)

Data S：Data Tの実河川資料から以下を除外したデータ

- ・Parker, Nakato, Bray, Colby・Hembree, Simons・Albertsonの各資料のうち、各セグメントで取るべき $d_r$ の範囲から外れたデータ

・山本資料のうち、特性量の傾向が他データ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。これらは $B/h$ が数百の複列砂州~うろこ状砂州の領域となっており、 $\tau_{cs}$ が無次元限界掃流力 $\tau_{c0}$ と同じかそれに極めて近いデータである。また、そのうち少なくとも6データは2011~2014年の航空写真から低水護岸が確認されている。

・九州3河川資料の全データ

Data E：表-1の実験資料から以下を除外したデータ

- ・水面勾配 $I_w$ を有する実験資料の $(I-I_w)/I$  5%のデータ

なお、Data Sにおける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ためそのまま用いた。山本資料は前述したよう

に一部のデータに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から、前述9データ以外はそのままだ。その他の実河川資料については既往の研究<sup>2)</sup>を踏まえて、護岸なしと見なした。また、九州3河川資料については、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箇所をもって安定河道の区間とした。

## (2) セグメントグループ

図-1~6は、河床勾配 $I$ に対する $h/d_R$ 、 $B/d_R$ 、 $B/h$ 、 $A/d_R^2$ 、 $\tau_{*s}$ および $d_R$ の依存性をData Sに基づき調べたもので、図中の記号は資料別(表-1)である。ここで、表-1に記載したようにParker資料にはセグメントMのデータが一部含まれているが、図-1等からわかるように、各特性量の傾向はセグメント1と同様であったので、グループAとして取り扱っている。

これらの図より、 $B/h$ を除く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できる。ただし、図-3と図-5からわかるように、 $\tau_{*s}$ 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。

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で掃流浮遊混在、3で浮遊のように、各セグメントでの土砂輸送形態が異なるためであるが、グループを区別する $d_R$ はセグメント2-1と2-2を区別する代表粒径( $d_R=1\text{cm}$ )程度で、これに対応する $I$ は $10^{-3}$ 程度である(図-6)。また、 $B/h$ は全セグメントではほぼ一定となるが、このことは式(6)と後述する式(10)および $\phi^{-1} \cdot Q/(gId_R^5)^{1/2} \sim I^{-5/2}$ なる関係<sup>7)</sup>から理解される。

## 3. $\tau_{*s}$ に基づく安定河道の式

### (1) 安定河道の横断形状を規定する無次元量

複断面水路では低水路、単断面水路では全断面を対象水路とすると、河道の横断形状(水深粒径比 $h/d_R$ 、川幅粒径比 $B/d_R$ )は、次元解析より式(1)に示した無次元量で表される。また、対象水路の河岸部を無視し、等流の支配則( $Q=AU$ 、 $\tau=\rho gh$ )と抵抗則として流速係数 $\phi(=U/u_*)$ を用いると、河道横断形状を規定する関係式である式(2)が得られる<sup>4),7)</sup>。

$$h/d_R, B/d_R = f(Q/\sqrt{gId_R^5}, s/I) \quad (1)$$

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

ここに、 $h$ ：平均水深(=A/B)、 $B$ ：川幅、 $d_R$ ：河床材料の代表粒径、 $Q$ ：河道形成流量、 $A$ ：河積、 $I$ ：河床勾配、

$s$ ：粒子の水中比重(= $\rho_s/\rho-1$ )、 $\rho$ ：水の密度、 $\rho_s$ ：粒子の密度、 $\tau_*$ ：無次元掃流力(= $hI/(sd_R)$ )、 $U$ ：断面平均流速、 $\tau$ ：河床せん断力、 $u_*$ ：摩擦速度(= $(\tau/\rho)^{1/2}$ )である。

### (2) $\tau_{*s}$ に基づく安定河道の式(安定河道の式)

$$h/d_R = \tau_{*s} \cdot (s/I) \quad (3)$$

$$B/d_R = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-3/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q/\sqrt{gId_R^5}) \quad (4)$$

$$A/d_R^2 = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-1/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q/\sqrt{gId_R^5}) \quad (5)$$

$$B/h = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-5/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q/\sqrt{gId_R^5}) \quad (6)$$

安定河道を規定する条件として、動的平衡状態にある無次元掃流力 $\tau_{*s}$ を用いると、 $\tau_{*s}=hI/(sd_R)$ より直ちに $h/d_R$ に関する式(3)が得られ、これに式(2)を考慮すれば、 $B/d_R$ 、 $A/d_R^2$ および $B/h$ に関する式(4)~(6)が導かれる。本論文では、式(3)~(6)を“安定河道の式”と呼ぶこととする。また、以下では誤解が生じない範囲で安定河道の式を式のように略称する。なお、式(1)を考慮して山本の式<sup>3)</sup>を無次元表示したものが式である<sup>7),8)</sup>。

式では $\tau_{*s}$ とそれを規定しているパラメータとの関係を定め、これを安定河道の条件として与える必要があり、その方法には理論的な方法と自然安定河道から学ぶ方法がある。前者の方法は、各セグメントでの土砂輸送形態を考慮して $\tau_{*s}$ を定める必要があり、掃流では混合砂礫の無次元限界掃流力 $\tau_{*c}$ 、代表粒径 $d_R$ および遮蔽効果、浮遊では砂の巻き上げ/堆積量などの知見が必ずしも十分でない中で、流量や供給土砂(質と量)の変動履歴を受けて形成された自然安定河道の縦断特性(セグメント特性)を考慮して $\tau_{*s}$ を定めなければならないといった難しさがある。後者の方法は、その代表的なものに前述した $\tau_{*s}=f(d_R)$ の経験則<sup>3)</sup>があるが、 $\tau_{*s}$ が $d_R$ のみに規定される根拠が明確ではなく、また限られた国内実河川データに基づき推定された関係であることから一般性に乏しいといった問題がある。

## 4. レジーム則を満たす条件

### (1) レジーム則を満たす条件

$$\alpha = (h/d_R)(B/d_R)^{-2/3} \quad (7)$$

$$\alpha = (h/d_R)^{1/3} (h/B)^{2/3} \quad (8)$$

$$\alpha = K \cdot (I/s)^n \quad (9), \quad \tau_{*s} = (K^{3/2} \cdot (B/h))^2 \quad (10)$$

$$\tau_{*s} = K^{1/2} \cdot [(I/s)^{5/2} \cdot (\phi^{-1} \cdot Q/(gId_R^5)^{1/2})]^{1/3} \quad (11)$$

“レジーム則を満たす条件”<sup>7),8)</sup>の概要は次の通りである。まず $\alpha=(h/d_R)(B/d_R)^p$ なる関係を仮定し、さらに式(2)を用いて、 $B \sim Q^{1/2}$ なる $B$ に関する代表的なレジーム則を満足するように $p$ を定めると、式(7)が得られる。また、式(7)は $h$ に関する代表的なレジーム則である $h \sim Q^{1/3}$ を同

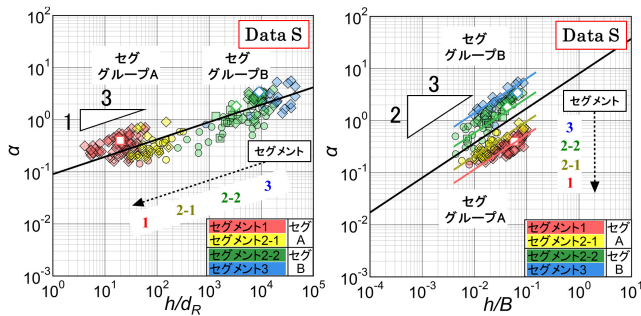


図-7  $\sim h/d_R$ の関係(左),  $\sim h/B$ の関係(右)

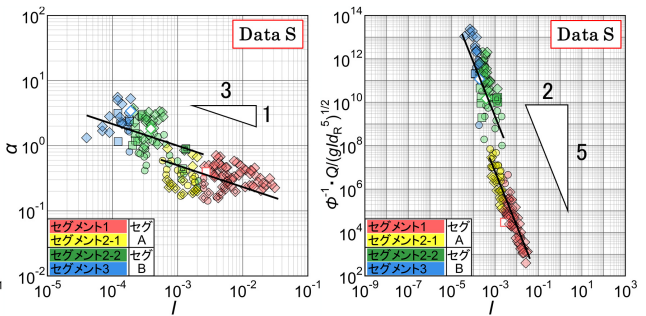


図-8  $\sim I$ の関係

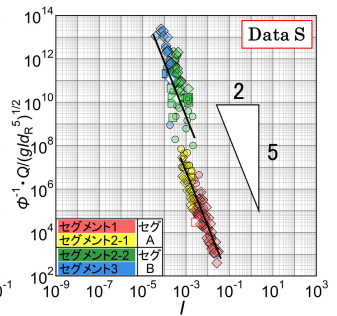


図-9  $\phi^{-1} \cdot Q / (g d_R^5)^{1/2} \sim I$ の関係

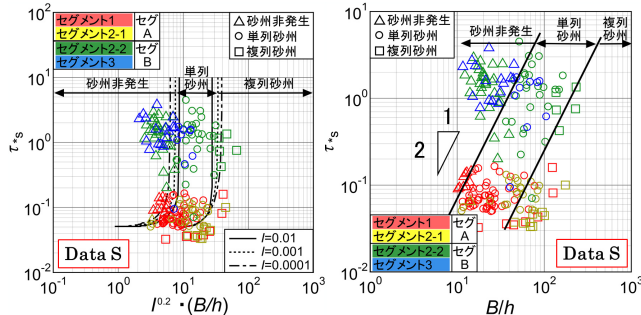


図-10  $\tau_s \sim I^{0.2} \cdot (B/h)$ の関係

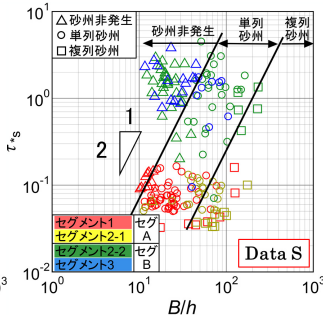


図-11  $\tau_s \sim B/h$ の関係

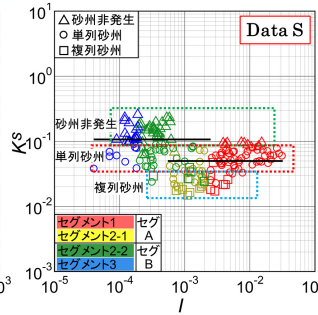


図-12  $K^S \sim I$ の関係

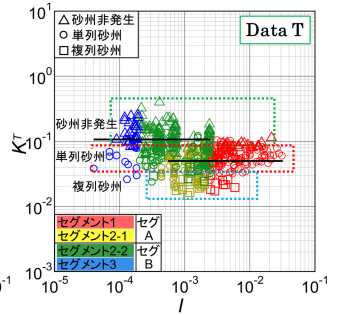


図-13  $K^T \sim I$ の関係

時に満たしている。

以下では式(7)を書き直した式(8)に基づき、先のセグメントグループに関する知見を踏まえ、“レジーム則を満たす条件”に基づかない式とData Sを用いて、同条件について検討する。

図-7は式(8)の妥当性を検討したものである。各セグメントに規則的に対応して、 $\alpha \sim (h/d_R)^{1/3}$ 、 $\alpha \sim (h/B)^{2/3}$ なる関係が成立しており、Data Sが経年的に安定した自然安定河道のデータであることを踏まえれば、式(8)が理にかなった安定河道の条件となっていることがわかる。

次に式(8)に含まれる $\alpha$ について検討する。式(1)および式(2)に含まれる無次元パラメータを勘案すれば、 $\alpha$ はせいぜい $W/s$ に依存するパラメータと考えられることから、式(9)で表せると仮定する。ここに、 $K$ は各グループで定められる係数である。式(9)の中の $n$ については、図-7から確認されるように $\alpha \sim (h/d_R)^{1/3}$ なる関係が良好に成立しており、図-1で確認されたようにセグメントグループ単位で $h/d_R \sim I^{-1}$ なる関係がある。以上から、各グループに対して $n = -1/3$ なる関係があることが理解され、図-8からこの関係の妥当性が確認される。

また、 $h/d_R \sim I^{-1}$ なる関係と式(3)より $\tau_s$ が $I$ に依存しないことがわかり、これは図-5から確認される。 $\alpha = K(I/s)^{-1/3}$ と式(8)より $B/h$ が $I$ に依存しないことが理解され、これは図-3から確認される。 $B/h$ に関するこの関係と $h/d_R \sim I^{-1}$ より、 $B/d_R \sim I^{-1}$ なる関係があり、さらに $A/d_R^2 \sim I^{-2}$ となっていることがわかる。これらはそれぞれ図-2、図-4から確認される。さらに、 $\tau_s$ と $B/h$ が $I$ に依存しないことを考慮すれば、式(6)より $\phi^{-1} \cdot Q / (g d_R^5)^{1/2} \sim I^{-5/2}$ なる関係<sup>7)</sup>が成立しており、図-9からこの関係の妥当性が確認されることから、 $B/h$ が $I$ に依存しないことが再確認される。

図中に示した黒の実線の傾きから明らかなように、自

然安定河道では、セグメントグループ単位で $\alpha = K(I/s)^{-1/3}$ なる関係と $h/d_R \sim I^{-1}$ 、 $B/d_R \sim I^{-1}$ 、 $A/d_R^2 \sim I^{-2}$ 、 $B/h \sim I^0$ 、 $\tau_s \sim I^0$ なる関係が成立しており、これらが完全に整合していることから、 $\alpha = K(I/s)^{-1/3}$ の妥当性があらためて確認される。

$\tau_s$ と $B/h$ が $I$ に依存しないことを踏まえれば、図-7は次のように理解される。すなわち、 $\alpha \sim (h/d_R)^{1/3}$ の関係については、 $I$ が大きなセグメント1から3の順に $\alpha$ は連続的に大きくなり、 $\alpha \sim (h/B)^{2/3}$ の関係については、各セグメントについて $\alpha \sim (h/B)^{2/3}$ なる関係を保ちつつ、セグメント1から3の順に $\alpha$ が大きくなる。

式(7)は $\alpha = K(I/s)^{-1/3}$ と式(3)より、式(10)のように表され、“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わかる。式(7)は次元解析と実験資料より得られた砂州の発生領域区分<sup>21)</sup>の関係と同様となっているが、式(10)はより明確な形で砂州の発生領域を規定する関係になっていることが確認される。これは、安定河道の横断形状と砂州のいずれも横断特性であることに他ならないが、図中のデータが安定河道から得られた $\tau_s$ と $B/h$ であるところに大きな違いがある。

図-10は、黒木・岸<sup>22)</sup>の砂州の領域区分を用いて安定河道と砂州の関係について調べたもので、Data Sはセグメントグループで大きく分かれ、グループA、Bはそれぞれ複列砂州~単列砂州、単列砂州~砂州非発生の領域にほぼ対応している。図-11は、図-10を踏まえて砂州の発生形態の観点から、式(10)について調べたもので、Data Sが式(10)の関係に従って、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していることがわかる。なお、図-10~13では、資料別(表-1)ではなく、砂州の発生形態別(図中の凡例)の記号を用いている。

(2)  $K$ および $\tau_s$ の評価



図-12は式(10)中の $K$ と $l$ との関係を調べたもので、これよりData Sより得られた $K$ 値( $K^S$ )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、Data Sが砂州の発生形態別に明確に区分される一方で、各セグメントグループ単位では $l$ に対する傾向的な依存性は認められないものの、グループ単位では明確に分かれている。これは、式(8)と $\alpha=K(l/s)^{-1/3}$ からわかるように、 $K$ 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ことによる。したがって、同図からわかるように、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状には対応関係があるが、必ずしも両者は一致しない。なお、図中の黒の実線は、Data Sより得られた各グループの $K^S$ の平均値を示したもので、その値はグループBで約0.1、Aで約0.05である。

前述したように、 $\tau_{cs}$ は各グループについてlog-logスケールで1サイクル以上のばらつきがあるが、 $K$ は $K=\tau_{cs}^{1/3} \cdot (B/h)^{-2/3}$ であるので、 $\tau_{cs}$ によるばらつきが減少すると同時に、自然安定河道が有する縦横断特性( $B/h$ )を後述する式に反映させることができる。 $K^S$ 値のばらつきに影響する要因としては、各資料における特性量の定義( $Q$ ,  $d_R$ )の違い、河床材料の採取場所と時期、平均水深( $h=A/B$ )と掃流力( $\tau=\rho g R I$ )の算定法などが考えられるが、算定法の違いについては、本研究では $B/h=10$ のデータは対象としていないので、この影響は小さい。

図-13は、Data Tより得られた $K^T$ 値と $l$ との関係を図-12と同様に調べたものである。これから確認できるように、 $K^T$ と砂州の発生領域の関係も約0.1以上、約0.1~0.03、約0.03以下で明確に区分でき、 $K^S$ と同様となっている。また各グループの $K^T$ の平均値も $K^S$ とほぼ同様となっている。表-2はData SとTから得られた $K$ の平均値と分散値をセグメントグループ別に示したものである。このように両Dataの $K$ の平均値と分散値の違いはない。

また、 $K=\tau_{cs}^{1/3} \cdot (B/h)^{-2/3}$ と式(6)より $B/h$ を消去すれば、 $\tau_{cs}$ と $K$ の関係が式(11)のように得られ、 $\tau_{cs}$ が水理量を含む $[(l/s)^{5/2} \cdot (\phi^{-1} \cdot Q/(g d_R^5)^{1/2})]^{1/3}$ なる無次元量で評価でき、これより各セグメントにおける $\tau_{cs} \sim d_R^{-5/6}$ の関係を連ねたものが、 $\tau_{cs}=f(d_R)$ の経験則<sup>3)</sup>であることも理解される<sup>8)</sup>。なお、 $\tau_{cs}$ が $h/d_R$ 、つまり水理量に規定されることは完全粗面乱流の抵抗則から直ちに理解されることである。

## 5. 安定河道の式とその検証と考察

$$h/d_R = K^{1/2} (I/s)^{-1/6} \cdot (\phi^{-1} Q / \sqrt{g d_R^5})^{1/3} \quad (12)$$

$$B/d_R = K^{-3/4} (I/s)^{1/4} \cdot (\phi^{-1} Q / \sqrt{g d_R^5})^{1/2} \quad (13)$$

$$A/d_R^2 = K^{-1/4} (I/s)^{1/12} \cdot (\phi^{-1} Q / \sqrt{g d_R^5})^{5/6} \quad (14)$$

$$B/h = K^{-5/4} (I/s)^{5/12} \cdot (\phi^{-1} Q / \sqrt{g d_R^5})^{1/6} \quad (15)$$

表-2  $K$  値の平均値と分散値

	セグメントグループ		セグメントグループ		
	A	B	A	B	
$K^S$ 平均値	0.05	0.10	$K^S$ 分散値	0.001	0.003
$K^T$ 平均値	0.05	0.10	$K^T$ 分散値	0.001	0.003

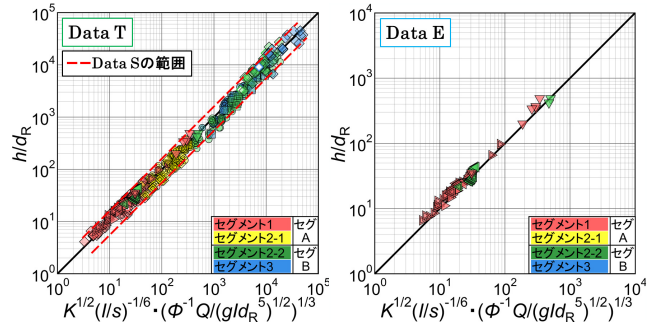


図-14 式(12)の $h/d_R$ の予測結果(左: Data T, 右: Data E)

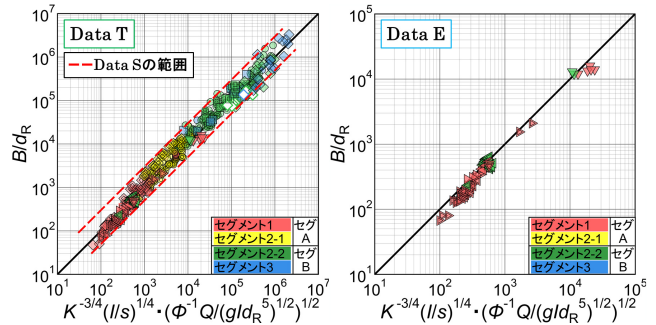


図-15 式(13)の $B/d_R$ の予測結果(左: Data T, 右: Data E)

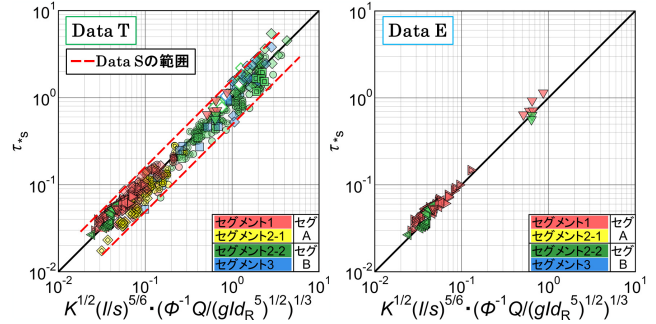


図-16 式(11)の $\tau_{cs}$ の予測結果(左: Data T, 右: Data E)

式(11)に式(11)を適用すれば、 $K$ を係数とする“安定河道の式(以下「式」という)”が、式(12)~(15)のように得られる。このように、式(11)と式(12)~(15)は式(11)を介して同一となる。なお、実測資料の $\phi$ は $\phi=Q/(Agh)^{1/2}$ のように算定されているので、式(2)は自動的に満たされるため、式(12)~(15)の予測誤差はそれぞれ $\tau_{cs}$ 、 $K$ から生じる。以下では $K^S$ の平均値(表-2)を用いて、Data TとEに対する式(12)~(15)の妥当性を検証する。なお、 $\tau_{cs}$ は式(11)から評価できる。 $A/d_R^2$ 、 $B/h$ の検証については紙面の都合で割愛する。図-14~16は、 $h/d_R$ 、 $B/d_R$ および $\tau_{cs}$ の予測値と実測値を比較してそれぞれ示したものである。これから確認できるように、式(11)は各セグメントの土砂輸送形態にかかわらず、全セグメントにわたってData TとEの横断形状と $\tau_{cs}$ を良好に予測できる。ここで、図中の赤の破線はData Sの散らばりの範囲を示したもので、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り、

概ね予測値の±50%以内であれば安定河道と判断できる。なお、セグメント2の区間が河道の大部分を占めるような河川については、各セグメントグループの $K^s$ の平均値(表-2)の中間値(0.075)を用いればよいと考えられる。

Data Tに関する以上の結果は、低水護岸で水路幅が拘束された九州3河川のような河道であっても、河床勾配と河道の断面形が経年的に安定した箇所では、安定河道あるいはそれに近い状態になっていることを示唆している。なお、図は割愛するが、自然安定河道と九州3河川の安定河道区間の $d_R$ に傾向的な違いは認められていない。またData Eに関する以上の結果は、一定流量・土砂供給量の条件下で形成された室内実験より得られた安定河道と、出水や供給土砂等の変動履歴を受けて形成された自然安定河道の横断形状の特性に大きな違いはないと考えられる一方で、図-14~16からわかるように $\tau_{cs}$ と $d_R$ との関係や縦断特性(セグメント)と横断特性の間に違いが認められるなど、両者は必ずしも同じではないことが示唆されている。

## 6. まとめ

本研究より得られた主要な知見を以下に示す。

“レジーム則を満たす条件”が式(10)のように、安定河道の $\tau_{cs}$ と $B/h$ との関係を規定する条件となっていることを明らかにした上で、式(11)のように $\tau_{cs}$ と $K$ との関係を定め、国内外の厳選された自然安定河道のデータ(Data S)に基づき、各セグメントグループの $K$ 値( $K^s$ の平均値)を定めた。

そのようにして定められた $K$ 値を用いた安定河道の式(式 )が、国内外の実河川のみならず、室内実験で得られた安定した砂礫河床水路の横断形状(水深粒径比 $h/d_R$ 、川幅粒径比 $B/d_R$ )と動的平衡状態の無次元掃流力 $\tau_{cs}$ を全セグメントにわたって良好に予測できることを実証した。

謝辞：福岡捷二先生(中央大学研究開発機構教授)には、自然に学ぶ方法でのデータの質の重要性など、多くのご指導を賜った。ここに記して深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 山本晃一: 沖積河川 -構造と動態-, 技法堂出版, p.587, 2010.
- 4) 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.

- 5) 例えば、福岡捷二, 坂口達哉: 無次元流量に対する無次元河幅・水深のとり範囲と整備途上河川への適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I\_1423I\_1428, 2012.
- 6) 例えば、福岡捷二: 札内川の河道変遷を考慮した治水と環境の調和した安定な河道縦・横断形状に関する研究, 研究紀要(XXIV), 北海道河川財団, pp.123-164, 2013.
- 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) 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.
- 9) 山本晃一: 河道特性論, 土木研究所資料, 第2662号, p.260, 1988.
- 10) Parker, G.: 1D SEDIMENT TRANSPORT MORPHODYNAMICS with applications to RIVERS AND TURBIDITY CURRENTS, [http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamiscs\\_e-book.htm](http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamiscs_e-book.htm)
- 11) 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.
- 12) Simons, D.B. and Albertson, M.L.: Uniform water conveyance channels in alluvial material, *Trans. ASCE*, Vol.128, pp.65~105, 1963.
- 13) Kellerhals, R.: Stable channels with gravel paved beds, *ASCE, J. WW Div.*, Vol.93, WW1, pp.63~84, 1967.
- 14) Bray, D. I.: Estimating average velocity in gravel-bed rivers, *ASCE, J. Hydraul. Div.*, Vol.105, HY9, pp.1103~1122, 1979.
- 15) Nakato, T.: Test of selected sediment-transport formulas, *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, Vol.116, No.3, pp.362-379, 1989.
- 16) Ikeda, S.: Self-formed straight channels in sandy beds, *ASCE, J. Hydraul. Div.*, Vol.107, HY4, pp.389~406, 1981.
- 17) 福岡捷二, 山坂昌成: なめらかな横断面形状をもつ直線水路のせん断力分布と拡幅過程の解析, 土木学会論文集, 第351巻II-2, pp.87-96, 1984.
- 18) 仲井敬司, 池田 宏: 安定河道形状に関する実験的研究, 筑波大学水理実験センター報告, No.8, 37~44, 1984.
- 19) 長谷川和義, 望月明彦: シルト・細砂からなる流路の浸食過程, 第31回水理講演会論文集, pp.725~730, 1987.
- 20) Diplas, P.: Characteristics of self-formed straight channels, *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, Vol.116, pp.707~728, 1990.
- 21) 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.
- 22) 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.

(2015.9.30受付)