

砂礫河川の平均スケールと動的平衡条件

BANK-FULL CHANNEL CHARACTERISTICS AND DYNAMIC EQUILIBRIUM CONDITION FOR GRAVEL BED AND SAND BED ALLUVIAL RIVERS

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²・和田 浩輔³

Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA and Kosuke WADA

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) 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博士前期課程 (同上)

The bank-full channel characteristics for gravel bed and sand bed alluvial rivers are investigated theoretically and empirically. Two sets of equations for describing the bank-full channel width and average depth for gravel bed and sand bed alluvial rivers are obtained. One satisfies rational regime relations, the other satisfies a dynamic equilibrium condition for stable channels. Using these sets of equations, a dynamic equilibrium condition for stable channels is identified. Then existing data of natural rivers in Japan is used to verify these sets of equations as well as the dynamic equilibrium condition for stable channels. The condition is found to well match with the data of natural rivers with sediment size ranging from sand to gravel.

Key Words : bank-full river width and depth, gravel and sand bed alluvial rivers, regime theory

1. はじめに

現在、多自然を基本とすることが川づくりの原則となっている。しかし実際は河川の治水機能と環境機能には相反する要素も多く、また両機能のバランスを図るための河川技術も未熟な状態にあるのが実情である。河道にある流量が与えられたとき、そこでの流下能力と河道の安定性は、供給土砂の質と量、河道の平面・縦断・横断特性、中小河床形態、植生の繁茂状況、水理構造物の設置状況、支川の合流などによって決まってくる。したがって、これらを的確に評価した上で計画や管理に反映させることが重要となるが、これまでは主に流下能力、すなわち河積確保に主眼が置かれ、どちらかといえば河道の維持や経済的設計にとって不可欠な河道の安定性は置き去りにされてきた感がある。しかし今日では、河積確保と河道の安定性の両要素を踏まえた合理的な計画・設計が求められており、それに環境機能をどう盛り込んでいけるのかが前述した「川づくりの原則」を実質化していく上での課題である。

このように河道の安定性は河川計画・管理にとって極めて重要であるが、周知の通り、この問題は古くて新しい河川工学の課題である。古くは移動床水理が未発達な状況下で安定な水路の幾何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¹⁾²⁾として取り扱われていた。それと平行して移動床水理も発展を重ね、今日では安定河道の問題を土砂移動の動的安定性の立場から理論的に取り扱えるまでになってきているが³⁾、しかしながら、河道を形成してきた供給土砂の質と量や、様々な規模の流量の履歴を考慮した上でセグメント1~3の広い範囲に適用できるまでには至っていない。

そのようなことから、レジーム論的ではあるが、河川計画・管理に資する河川技術の観点から、実河川資料と次元解析⁴⁾や、実河川資料から見いだされた土砂移動の動的平衡条件に基づく解析⁵⁾のように、河川から学ぶことで安定河道の平均スケールを予測しようとする研究も活発になされている。

本研究は、以上のような背景と、安定河道の平均スケールに関する経験式、半理論式および理論式の相互の関連や、河道の動的安定条件について必ずしもよくわかっていないことを踏まえ、まず等流理論から得られる河道の平均スケールに関する関係式、およびこの関係式に安定河道の条件(動的平衡条件あるいはレジーム則を満足する条件)を付加したときに得られる関係式を示し、次に既存の実河川資料⁶⁾に基づき、安定河道の条件を付加したいずれの関係式もほぼ同程度に河道の平均スケールを予測可能であることを示す。最後に両関係式から動的平衡条件を求め、動的平衡条件と河道の平均スケール

に関する関係式の改善法を明らかにする。

2. 安定河道の平均スケール

(1) 安定河道の平均スケールを規定する無次元量

安定河道の横断形状が川幅 B と平均水深 h で表されるとすると、その平均スケールは次の変量で規定される。

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

ここに、 Q ：河道形成流量、 I ：河床勾配、 d_R ：河床材料の代表粒径、 ρ ：水の密度、 ρ_s ：粒子の密度、 g ：重力加速度である。

上式は次元解析より式(2)のようになる。無次元掃流力 $\tau_* (=u_*^2/(sgd_R))$ は $\tau_* = (I/s)(h/d_R)$ のように表せるので、 h/d_R と B/d_R は例えば式(3)のような無次元量で表される。

$$f_2(Q/\sqrt{gId_R^5}, B/d_R, h/d_R, I, s) = 0 \quad (2)$$

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

ここに、 h/d_R ：水深粒径比、 B/d_R ：川幅粒径比、 s ：粒子の水中比重 $(=\rho_s/\rho-1)$ である。

福岡⁴⁾は、一級河川基準地点の河道を対象とし、河道形成流量 Q を計画高水流量として、次元解析とわが国と海外の実河川および室内実験資料に基づき、次のような関係を得ている。以下、この関係を福岡の式と呼ぶ。

$$h/d_R = 0.13(Q/\sqrt{gId_R^5})^{0.38} \quad (4)$$

$$B/d_R = 4.25(Q/\sqrt{gId_R^5})^{0.40} \quad (5)$$

(2) 等流理論に基づく河道の平均スケール

河岸部を無視した低水路を対象として、抵抗則として流速係数 $\phi (=U/u_*)$ を用いれば、等流理論 $(Q=AU, \tau=pgl, \text{抵抗則})$ より直ちに式(6)が得られる。ここに、 A ：河積、 U ：断面平均流速、 τ ：河床せん断力、 u_* ：摩擦速度 $(=\tau/\rho)^{1/2}$ である。

$$(B/d_R)(h/d_R)^{3/2} = \phi^{-1} \cdot (Q/\sqrt{gId_R^5}) \quad (6)$$

式(6)は次のように変形できる。

$$h/d_R = C_1 \cdot (Q/\sqrt{gId_R^5})^{2/5} \quad (7)$$

$$B/d_R = C_2 \cdot (Q/\sqrt{gId_R^5})^{2/5} \quad (8)$$

ここで、係数 C_1, C_2 はそれぞれ次のようになり

$$C_1 = (B/h)^{-2/5} / \phi^{2/5} \quad (9) ; \quad C_2 = (B/h)^{3/5} / \phi^{2/5} \quad (10)$$

両係数には次の関係がある。

$$\phi = (C_2 C_1^{3/2})^{-1} \quad (11)$$

以上のように、 $h/d_R, B/d_R$ に関する関係式がそれぞれ式(7)、(8)のように得られる。この関係式は福岡の式と類似しているが、式(7)の $Q/(gId_R^5)^{1/2}$ の乗数が0.4となつて

いることや、式(4)と(5)の係数値も含めたものが福岡の式であることなどの理由から、以下では式(7)と(8)を等流の関係式と呼ぶこととする。

(3) 安定条件を考慮した河道の平均スケール

a) 動的平衡条件を考慮した河道の平均スケール

山本⁵⁾は、沖積河川の低水路の河道形成流量 Q を平均年最大流量(≡低水路満杯流量)と規定した上で、実験およびわが国の実河川の資料に基づき、河床の動的平衡条件、つまり安定河床の無次元掃流力 $\tau_{*s} (=u_{*s}^2/(sgd_R))$ が河床材料の代表粒径 d_R で表せることを経験的に見出し、またこの条件と等流理論より低水路の平均スケールが $h \sim I^{-1}, B \sim QI$ のように表せることを明らかにしている。ただし、動的平衡条件を $u_{*s}^2 \sim d_R$ の関係として与えているために、河道の平均スケールが次元を有し一般性を欠いたものになっている。そこでここでは τ_{*s} を動的平衡条件とし、また $\tau_{*s} = f(d_R)$ のような経験的な関係を仮定せず、平均スケールを求めることとする。

動的平衡条件を用いれば、 $\tau_{*s} = u_{*s}^2/(sgd_R)$ と $u_{*s} = (ghI)^{1/2}$ より h/d_R の関係が式(12)のように得られ、式(6)と(12)より B/d_R の関係が式(13)のように求められる。

$$h/d_R = \tau_{*s} \cdot (s/I) \quad (12)$$

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

また式(12)、(13)より、河積 A と川幅水深比 B/h は次のようになる。

$$A/d_R^2 = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-1/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q/\sqrt{gId_R^5}) \quad (14)$$

$$B/h = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-5/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q/\sqrt{gId_R^5}) \quad (15)$$

このように河道の平均スケールは、式(2)で示した無次元量で表される。以下、式(12)~(15)を安定河道の式Iという。なお、池田ら³⁾は、礫河川の安定横断形状を理論的に求めており、河岸部を除いた河道中央部の水深と川幅はそれぞれ $h \sim d_R(s/I), B \sim Q/(\phi(gI)^{1/2})$ のように山本の式と同様な結果となっている。また誤差の範囲内で山本の式と一致することも具体的に示されている。

このように河道中央部の平均スケールについて両結果がほぼ同じになる。これは、動的平衡条件として τ_{*s} を与えれば、 h は式(12)のように流量 Q とは無関係に決まり、 B は式(6)から定まってくるからである。したがって τ_{*s} を用いると、必ず $B \sim Q$ のような関係になり、後述する流路形状に関するレジーム則のような関係は得られない。

b) レジーム則を満足する河道の平均スケール

安定河道の条件として、動的平衡条件の代わりに、 $B \sim Q^m$ のように決められるレジーム則を満たす条件を考える。レジーム則は経験則なので m 値が一律に定まっているわけではないが、 $m=0.5$ 前後の値を取ることが広く知られている¹⁾²⁾。ここでは、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⁷⁾などの既往の研究成果も踏まえ、 $m=0.5$ と仮定する。

いま Q と独立な無次元パラメータ α を導入し、 $(h/d_R)(B/d_R)^p = \alpha$ と置くと、式(6)より $(B/d_R)^{-(3p+2)^2} \sim Q/(gI d_R^5)^{1/2}$ となり、 $B \sim Q^{1/2}$ となるための必要条件是 $p=2/3$ となる。これより、レジーム則を満足する関係が式(16)のように得られる。なお、 α については後ほど検討する。またレジーム則では、 $h \sim Q^n$ の関係において一般に $n=0.3 \sim 0.4$ 程度の値を取ることが知られており¹⁾²⁾、 $p=2/3$ では $n=1/3$ となるので、この点においても式(16)はレジーム則と整合した条件であると考えられる。

$$(h/d_R)(B/d_R)^{-2/3} = \alpha \quad (16) ; h/d_R = \alpha^3 \cdot (B/h)^2 \quad (17)$$

式(16)は式(17)のように書き換えられる。この式(17)は次元解析と実験資料より得られた砂州の領域区分⁸⁾に用いられた関係と全く同じになっており、またその領域区分図では砂州のタイプ(単列、複列砂州など)とは無関係に式(17)の関係が成立しているこのことから、式(16)は水みちの形成条件、つまり安定した状態にある河道の断面形の条件として妥当なものであると考えられる。以上を踏まえ、式(16)を安定河道の条件と呼ぶこととする。

安定河道の条件を用いれば、式(6)と(16)より、河道の平均スケールに関する関係式が ϕ 、 $Q/(gI d_R^5)^{1/2}$ で表され、次のように得られる。以下、式(18)~(21)を安定河道の式IIという。

$$h/d_R = \alpha^{1/2} \cdot (\phi^{-1} Q / \sqrt{gI d_R^5})^{1/3} \quad (18)$$

$$B/d_R = \alpha^{-3/4} \cdot (\phi^{-1} Q / \sqrt{gI d_R^5})^{1/2} \quad (19)$$

$$A/d_R^2 = \alpha^{-1/4} \cdot (\phi^{-1} Q / \sqrt{gI d_R^5})^{5/6} \quad (20)$$

$$B/h = \alpha^{-5/4} \cdot (\phi^{-1} Q / \sqrt{gI d_R^5})^{1/6} \quad (21)$$

(4) 等流の関係式と安定河道の式I、IIとの関係

式(7)、(8)の等流の関係式を基準形とし、それと同形になるように安定河道の式I、IIを書き換えると、各々の係数 C_1 、 C_2 はそれぞれ式(22)と(23)、式(24)と(25)のように表される。また、安定河道の式I、IIのいずれについても C_1 と C_2 には式(11)の関係が成立する。なお、等流の関係式の係数は、式(9)、(10)に示したとおりである。

$$C_{11} = \tau_{*s} \cdot (s/I) (Q/\sqrt{gI d_R^5})^{-2/5} \quad (22)$$

$$C_{12} = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-3/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q/\sqrt{gI d_R^5})^{3/5} \quad (23)$$

$$C_{111} = \alpha^{1/2} \phi^{-1/3} \cdot (Q/\sqrt{gI d_R^5})^{-1/15} \quad (24)$$

$$C_{112} = \alpha^{-3/4} \phi^{-1/2} \cdot (Q/\sqrt{gI d_R^5})^{1/10} \quad (25)$$

このように、安定河道の式Iと安定河道の式IIでは係数に含まれる無次元量や ϕ 、 $Q/(gI d_R^5)^{1/2}$ の乗数が全く異なってくる。

3. 考察

わが国の河川資料⁶⁾を用いて、安定河道の式IとII、動的平衡条件等について検討を加える。この資料では、

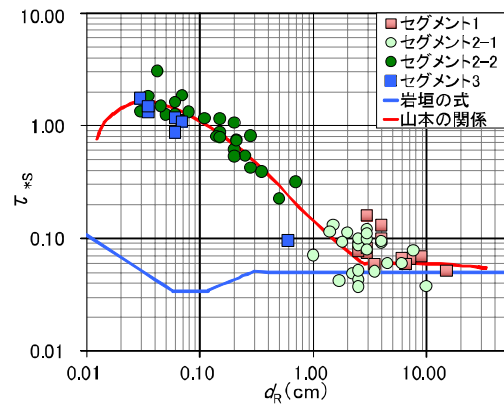


図-1 $\tau_{*s} \sim d_R$ の関係

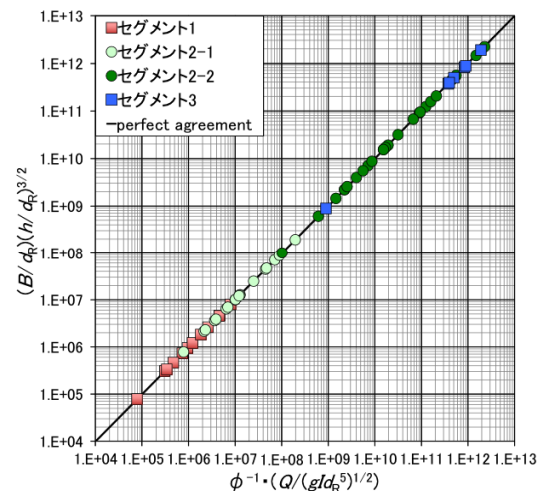


図-2 $(B/d_R) / (h/d_R)^{3/2} \sim \phi^{-1} \cdot (Q/(gI d_R^5)^{1/2})$ の関係

対象水路は低水路、代表粒径 d_R は60%粒径 d_{60} 、 h は等流理論より $h=(Q/(\phi B(gI)^{1/2}))^{3/2}$ のように求められているので、これらの条件を踏まえて以下検討する。なお以下に示す図では、河床勾配からセグメントを区分し、セグメント別に資料を色分けしている。

(1) $\tau_{*s} \sim d_R$ の関係および式(6)の確認

図-1は、赤線で示した山本の $\tau_{*s} \sim d_R$ の関係⁵⁾について確認したものである。これよりセグメント2-2と3のデータは $\tau_{*s} \sim d_R$ の関係に沿って分布しているものの、セグメント1と2-1ではデータに散らばりが大きいことが確認できる。なお、セグメント2-1のデータの一部が青線で示した限界掃流 τ_{*c} 未満となっていることから、以下の検討ではそれらのデータを除いた資料を用いることとする。

図-2は、式(6)の関係について確認したものである。先述したように $h=(Q/(\phi B(gI)^{1/2}))^{3/2}$ のように算定されているので、式(6)の関係は自動的に満たされる。

(2) 安定河道の式Iの検討

図-3は、安定河道の式Iの予測値と実測値を比較したものである。なお、予測値を得るためには動的平衡条件が必要なので、ここでは図-1に赤線で示した $\tau_{*s} \sim d_R$ の関係が成立すると仮定して予測値を求めている。

これからわかるように、全体的に見れば予測値は実測値を良好に予測している。ただし、やや散らばりが大きい。式(6)の適合度は図-2で示したとおりなので、図-3に見られるデータの散らばりは $\tau_{s\sim}d_R$ の関係に起因している。このことは、 A/d_R^2 、 B/d_R 、 B/h の順に適合度が悪くなっていることから裏付けられる。すなわち、 $h/d_R \sim \tau_{s\sim}$ であるので、 h/d_R は $\tau_{s\sim}d_R$ の関係程度の誤差を有している。また式(13)-(15)において無次元量 $\phi^{-1} \cdot (Q/(gld_R^5)^{1/2})$ は共通で、 $A/d_R^2 \sim \tau_{s\sim}^{-1/2}$ 、 $B/d_R \sim \tau_{s\sim}^{-3/2}$ 、 $B/h \sim \tau_{s\sim}^{-5/2}$ であるので、 A/d_R^2 で生じる誤差を基準とすると、 B/d_R ではその3乗、 B/h ではその5乗のように誤差が拡大する。特に、図-1で見たようにセグメント1と2-1では、 $\tau_{s\sim}d_R$ の関係との誤差が大きいので、散らばりも大きくなり、また B/h では予測値からの傾向的なずれも生じている。

(3) 安定河道の式IIの検討

安定河道の式IIは ϕ 、 $Q/(gld_R^5)^{1/2}$ を含んでおり、これら以外に平均スケールに影響する無次元量としては s/I が考えられることから、 α と I の関係について調べたものが図-4である。ややばらつきは認められるものの、明らかに $\alpha \sim s/I$ なる関係が成立していることが確認できる。 I 以外の他の無次元量が α に関与している可能性も残っているが、データ数の関係からこれ以上の検討は困難であるので、ここでは α を次のように表すこととする。

$$\alpha = KI^{-1} \quad (26)$$

ここに、 K は各セグメントに応じて一定値を取る係数で、山本の資料に基づけば、セグメント1で $K=0.00036$ 程度、2-1で 0.00035 程度である。セグメント2-2と3ではデータの傾向がやや異なっているが、セグメント3のデータ数の関係からセグメント2-2と3をまとめて評価すると、 0.00043 程度である。このように各セグメントで K 値は若干異なるが、セグメント単位で K 値を同定できるほど十分なデータ数ではないので、ここでは全セグメントに対して $K \approx 0.0004$ の一定値とすることとする。

図-5は、式(26)で $K=0.0004$ として安定河道の式IIより得られた低水路の平均スケールの予測値と実測値を比較したものである。安定河道の式Iより全体的にやや適合度が高くなっており、特にセグメント1と2-1ではかなり改善されている。このような適合性が得られるということは、セグメント単位でレジーム則が成立していることを意味するだけでなく、式(16)と(26)が安定河道の条件として妥当なものであることを示している。

安定河道の式IIでは、各平均スケールの ϕ と $Q/(gld_R^5)^{1/2}$ に対する依存性が異なるので、安定河道の式Iのように単純比較はできないものの、データの散らばりは安定河道の条件中の α に起因している。すなわち、 A/d_R^2 、 B/d_R 、 B/h の順に適合度が悪くなっており、 $h/d_R \sim \alpha^{1/2}$ であり、また式(18)-(21)からわかるように $A/d_R^2 \sim \alpha^{-1/4}$ 、 $B/d_R \sim \alpha^{-3/4}$ 、 $B/h \sim \alpha^{-5/4}$ であるので、 A/d_R^2 で生じる誤差を基準とすると、

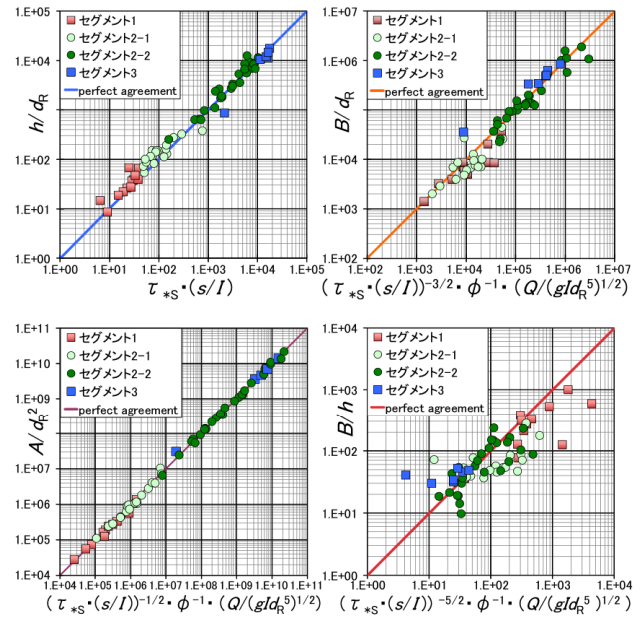


図-3 安定河道の式Iを用いた予測値と実測値との比較

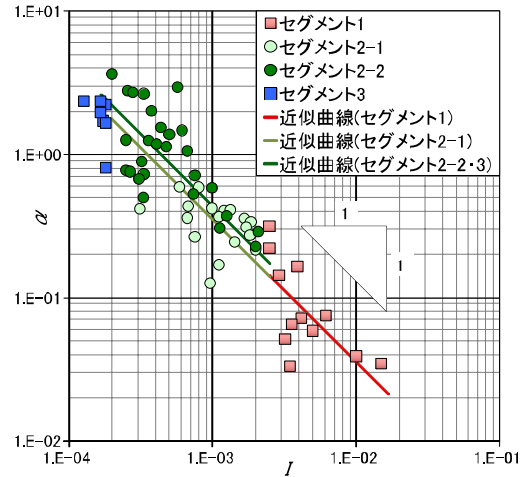


図-4 $\alpha \sim I$ の関係

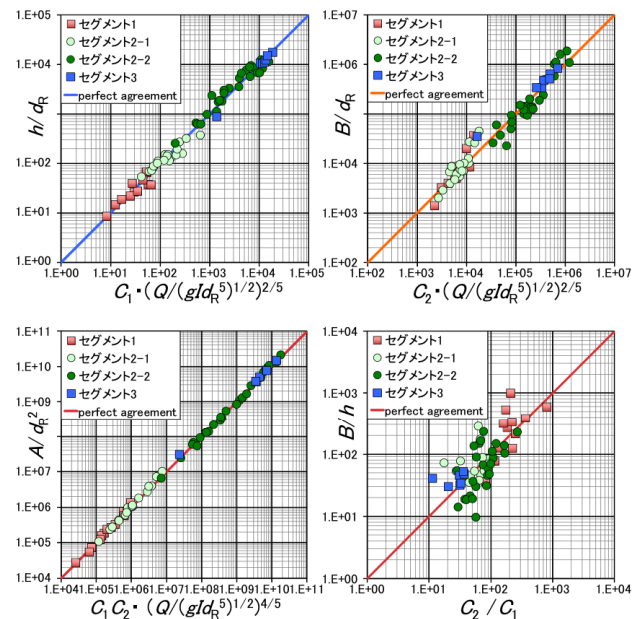


図-5 安定河道の式IIを用いた予測値と実測値との比較

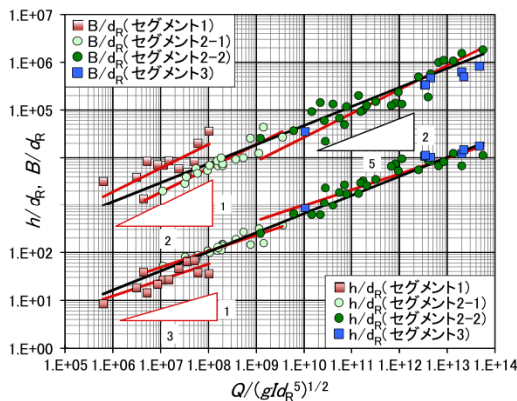


図-6 $h/d_R, B/d_R \sim (Q/(gld_R^5)^{1/2})^{2/5}$ の関係

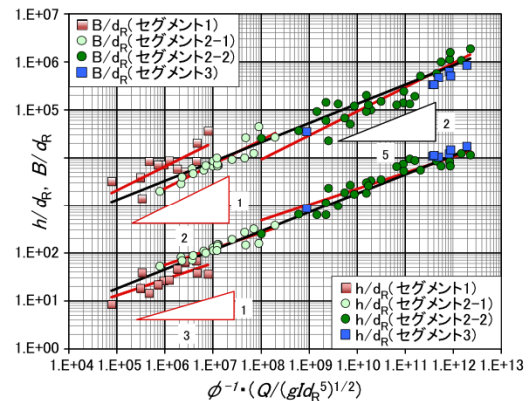


図-7 $h/d_R, B/d_R \sim \Phi^{-1} \cdot (Q/(gld_R^5)^{1/2})$ の関係

B/d_R ではその3乗, B/h ではその5乗となっている。

(4) 等流の関係式と安定河道の式との関係

図-3と図-5で見たように, 安定河道の式 I, IIのいずれも低水路の平均スケールを概ね良好に予測できている。このことは, 安定河道を規定する条件として, $\tau_{*s} \sim d_R$ なる動的平衡条件と安定河道の条件が概ね同様なものとなっていることを意味する。これを踏まえ, その式形から比較が容易な安定河道の式 II を用いて, 等流の関係式との関係について検討する。

図-6, 図-7は, 資料のみを用いて低水路の平均スケールと安定河道の式 II を構成する無次元量 $Q/(gld_R^5)^{1/2}$, $\phi^{-1} \cdot Q/(gld_R^5)^{1/2}$ との関係について調べたものである。図-6より, 全セグメントに対しては式(7), (8)の $h/d_R \sim (Q/(gld_R^5)^{1/2})^{2/5}$, $B/d_R \sim (Q/(gld_R^5)^{1/2})^{2/5}$ の等流の関係式が, 各セグメントに対しては式(18), (19)の $h/d_R \sim (Q/(gld_R^5)^{1/2})^{1/3}$, $B/d_R \sim (Q/(gld_R^5)^{1/2})^{1/2}$ の安定河道の式 II が成立していることが見て取れる。ただし, 等流の関係式はセグメント1に対して誤差が大きくなる。

このように動的平衡条件あるいは安定河道の条件を考慮すれば $h \sim Q^{1/3}$, $B \sim Q^{1/2}$, しなければ $h \sim Q^{2/5}$, $B \sim Q^{2/5}$ のようになると考えられる。なお, 等流の関係式が全セグメントに対して一定精度で成立するのは, 各セグメントで $Q/(gld_R^5)^{1/2}$ の取り得る範囲に制約があることと, 式(24), (25)からわかるように h/d_R と B/d_R の関係に関する係数中の $(Q/(gld_R^5)^{1/2})$ の乗数がそれぞれ $1/15$ と $1/10$ のように小さいことの両因からである。

図-6と図-7の比較より, ϕ は $B/d_R \sim Q/(gld_R^5)^{1/2}$ の関係をわずかに変化させる程度で, 低水路の平均スケールは主に $Q/(gld_R^5)^{1/2}$ によって規定されていることが確認できる。図-7より, 各セグメントに対して $B/d_R \sim (\phi^{-1} \cdot (Q/(gld_R^5)^{1/2}))^{1/2}$ の関係が認められる。その一方で, 式(13)は $B/d_R \sim \tau_{*s}^{-3/2} \cdot \phi^{-1} \cdot (Q/(gld_R^5)^{1/2})$ なる関係があることを示している。このことは, 各セグメントの τ_{*s} は $\tau_{*s} \sim (\phi^{-1} \cdot (Q/(gld_R^5)^{1/2}))^{1/3}$ のようになっており, 必ずしも $\tau_{*s} \sim d_R$ のような関係ではないことを示唆している。

式(6)の式変形だけで得られる等流の関係式は, 福岡の式と同様に式(7), (8)の係数値を経験的に定める必要が

ある。資料に基づけば C_1 と C_2 はそれぞれ 0.06 程度, 4.40 程度で, C_2 は福岡の式の式(4)の係数値とほぼ同じである。一方 C_1 値は福岡の式の半分程度となっている。これは式(3)の $(Q/(gld_R^5)^{1/2})$ の乗数が若干異なることなどの理由によると考えられる。また式(11)と $C_1=0.06$, $C_2=4.40$ を用いて ϕ 値を評価すると $\phi=15.5$ となり, 実河川で取り得る粗度係数に対応する妥当な ϕ 値となっている。このことは, 河道形成流量を水路満杯流量とすれば, 低水路, 全水路の区別なく, 河道の平均スケールを等流の関係式で取り扱えることを示唆している。

(5) 動的平衡条件の検討

以上から明らかなように, 安定河道の式 I, II の予測値と実測値の差異は, それぞれ $\tau_{*s} \sim d_R$ なる動的平衡条件, 安定河道の条件から生じており, いずれの条件も改善が求められる。 $\tau_{*s} \sim d_R$ の関係を動的平衡条件とした場合では, $\tau_{*s} \sim d_R$ の関係が経験則なので改善の方向性は定かではない。またセグメント1と2-1のデータの散らばりの原因(図-1), $\tau_{*s} \sim d_R$ のような関係ではない可能性(図-7)について合理的な説明が必要である。一方, 安定河道の条件については, 多くの資料に基づき式(26)の精度を向上させることによって安定河道の式 II の予測精度を高められるので, 改善の方向性が明確である。

以上の理由から, 式(26)を介して動的平衡条件を求めることとする。すなわち, 式(21)と(23), 式(22)と(24)を等値すると, 式(27), 式(28)が得られる。安定河道の式 I, II のいずれも動的平衡条件と安定河道の条件以外は共通の関係式である式(6)に基づいているので, 式(27)を式(28)に代入すれば式(28)は自動的に満たされる。したがって, 式(27)が τ_{*s} を与える関係式であり, 同時に安定河道の式 I とレジーム則とを結びつける関係式でもある。

$$\tau_{*s} = \alpha^{1/2} \cdot (s/I)^{-1} (\phi^{-1} Q / \sqrt{gld_R^5})^{1/3} \quad (27)$$

$$\alpha^{-3/4} \phi^{1/2} = (\tau_{*s} \cdot (s/I))^{-3/2} (Q / \sqrt{gld_R^5})^{1/2} \quad (28)$$

いま α が式(26)で表せると仮定すれば, $K=0.0004$, $s=1.65$ として, 動的平衡条件の一つの表し方として式(29)が得られる。同式は図-7において資料のみから推定された $\tau_{*s} \sim (\phi^{-1} \cdot (Q/(gld_R^5)^{1/2}))^{1/3}$ の関係とも整合している。

$$\tau_{*S} \doteq 0.012((I/\phi) \cdot Q/\sqrt{gd_R^5})^{1/3} \quad (29)$$

図-8は、式(29)に基づき $\tau_{*S} \sim d_R$ の関係について検討したものである。図中の実線は各セグメントの取り得る d_R の範囲(セグメント1で2cm以上、2-1で1~3cm、2-2と3で1cm以下)を考慮して示した回帰曲線である。

これより、山本が経験的に得たセグメント2-2の関係は、実は式(29)の $\tau_{*S} \sim d_R^{-5/6}$ の関係を表したもので、セグメント1と2-1の資料の散らばりも実は散らばりではなく $\tau_{*S} \sim d_R^{-5/6}$ の関係を表したものであることがわかる。式(29)からわかるように、 d_R の乗数は-5/6なので支配的な物理量であり、また各セグメントで d_R と無次元限界掃流力 τ_{*C} の取り得る範囲が限定されているために、山本が示したセグメント2-1の関係は良い近似となっている。しかし、セグメント1と2-2では必ずしもそうとはいえない。

図-9は、式(29)を用いて計算された τ_{*S} と、 τ_{*S} の実測値を比較したものである。同図より、図-8で見られたセグメント1と2-1のデータの散らばりが小さくなり、セグメント1~3の広い範囲で両者が良好に適合していることが確認できる。このように、 τ_{*S} は I/ϕ と $Q/(gld_R^5)^{1/2}$ によって規定されている。なお ϕ とFroude数 $Fr(=Q/(B(gh^3)^{1/2}))$ には、 $\phi=Fr \cdot I^{1/2}$ なる関係があるので、式(29)は式(30)のようにも表せる。式(30)は、例えば川幅や平均水深が既知な河道の安定性の判断、平均河床高と高水敷高の比高差を一定に保った川幅設定の検討などにおいて便利である。

$$\tau_{*S} \doteq 0.012((I^{3/2}/Fr) \cdot Q/\sqrt{gd_R^5})^{1/3} \quad (30)$$

4. まとめ

本研究より得られた主要な知見を以下に示す。

(1) レジーム則を満足する安定河道の条件と安定河道の式IIを提案し、この式と動的平衡条件を満足する安定河道の式Iの予測結果を実河川資料と比較することで、動的平衡条件を考慮した安定河道の式Iがレジーム則を満たした関係式となっていることを明らかにした。

(2) 全セグメントに対しては、等流の関係式 $(h/d_R \sim (Q/(gld_R^5)^{1/2})^{2/5}, B/d_R \sim (Q/(gld_R^5)^{1/2})^{2/5})$ が、各セグメントに対しては、安定河道の式Iあるいは安定河の式II $(h/d_R \sim (Q/(gld_R^5)^{1/2})^{1/3}, B/d_R \sim (Q/(gld_R^5)^{1/2})^{1/2})$ が成立しており、動的平衡条件あるいは安定河道の条件を考慮すれば $h \sim Q^{1/3}$, $B \sim Q^{1/2}$, 考慮しなければ $h \sim Q^{2/5}$, $B \sim Q^{2/5}$ のようになることを明らかにした。

(3) 山本の $\tau_{*S} \sim d_R$ の関係の問題点を指摘するとともに、安定河道の式IとIIより、動的平衡条件の一つの表し方として式(29)を提示するとともに、安定河道の式I、IIの改善の方向性を明らかにした。

なお、本論文で用いた資料のうちセグメント2-2以外のデータ数は必ずしも十分ではない。今後はセグメント

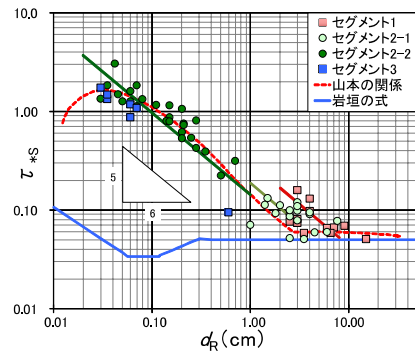


図-8 $\tau_{*S} \sim d_R^{-5/6}$ の関係

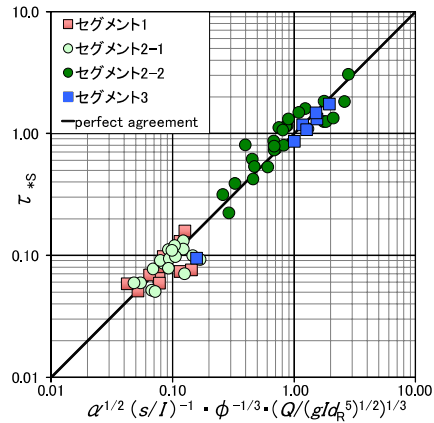


図-9 τ_{*S} の予測値と実測値との比較

1などの実河川データを収集し、式(26)の精度向上を図り、動的平衡条件および河道の平均スケールの予測式の精度を向上させたいと考えている。

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、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.
- 4) 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) 山本晃一: 沖積河川 -構造と動態-, 技法堂出版, p.587, 2010.
- 6) 山本晃一: 河道特性論, 土木研究所資料, 第2662号, p.260, 1988.
- 7) 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.
- 8) 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.