

沖積地の安定な流路幅に関する既往研究の 総説の試み

AN ATTEMPT OF COMPREHENSIVE REVIEW OF RESEARCH ON STABLE RIVER CHANNEL GEOMETRY IN ALLUVIAL PLAIN

井上和則¹
Kazunori INOUE

¹正会員 工修 (株)オリエンタルコンサルタンツGC事業本部(〒151-0071東京都渋谷区本町3-12-1)

This paper is an attempt of comprehensive review of research on stable river channel geometry to consider the recent attention to stable channel width against various discharges. Not only regime concepts, tractive force (theoretical) approaches but also extremal hypothesis approaches were reviewed. It was highlighted out of the reviewed papers there might be a kind of constant aspect ratio (B/h) regardless the channel (discharge) scale when their width - discharge relation followed the regime equation form. Such B/h can be regarded quite significant to quantify the stable channel geometry. It was reviewed that both the empirical and analytical approaches has shown certain ways to evaluate the specific B/h to support the stable channel forming. However, the variability of B/h according to both theoretical and empirical ones is found still to be significantly large around one order, which limits the effectiveness to predict a stable channel width.

Key Words: regime concept, stable channel, downstream hydraulic geometry, aspect ratio, channel forming discharge

1. 安定な川幅研究の意義

沖積区間における安定流路の横断形状と水量の関係、特に流量と川幅の関係については、19世紀より現在まで理学と工学の分野で数多くの研究がある。日本でも河川の平衡状態の指向に着目し、河道の縦横断形状と流量および河床材料との関係を経験的あるいは土砂水理学的に考察し、河道計画に取り入れる試みが1980年代まで行われた¹⁾。

しかし、日本の大河川では、中世より築堤が行われ、堤防法線が概成していることに加え、人間活動による流域環境の変化や河川に対する直接的な働きかけ(例えばダムによる洪水調節の増加、河川での大量の砂利採取)が盛んになるとともに、河床や流路の変動が激しくなった。そして頻発する河川災害を防止する目的で河道を極度に固定するようになり、安定河道の意義は失われ、そのような研究はこの20年ほどあまり行われなくなった。一方海外では自然河川を対象に、特に地形学の分野で、レジーム理論以降、安定な流路幅の経験的、解析的な研究が継続的に行われている。

近年、日本では多自然型川づくりへと施策が移行し、

河道設計においても従来ほど固定化しなくてもよい流路幅が着目されており²⁾、改めて、流域特性、すなわち流量(土砂量)、谷勾配、河床材料等によって下流の沖積河道幅がどのような大きさを持つべきかの定量的な把握は重要になっている。また、途上国の沖積地において、気候変動による降雨の変化に対する適応策の必要性は、河道設計をより長い時間スケールで捉えることを技術者に促している。

本論は、川幅の研究の現在的な意義を認識し、レジーム概念から始まる経験的な研究、土砂水理学的研究、そして特に従来和文で紹介されることの少なかったいわゆる仮説を取り入れた解析的な研究の、地形学の分野を含めて総説を試みた。かつて、流量の冪乗と川幅の関係がレジーム式のような線形関係に従う傾向がある時、河道スケールによらずある一定の川幅水深比(B/h)が存在する可能性が指摘された^{3), 14)}。本論後半では、特に安定な流路における B/h の定量的評価に繋がる河岸強さを考慮した仮説研究と、Empiricalな B/h の定量的評価の研究に着目し、今後の研究の方向性について述べる。

なお本論では「断面」は川幅と平均水深で表現される長方形断面、「断面形」は河岸形状を含む横断形を意味する。

2. 安定な河道の捉え方

河川としての安定流路を論じる際には、対象とする時間スケールを明確にすることが重要である。Knighton³⁾の時間・空間スケールの概念によれば、河道区間の蛇行波長などの平面形状形成は100年オーダーの時間スケール、谷勾配形成の時間スケールはそれよりも長い。河道に大規模な人の手が加わってからの時間スケールは数100年のオーダーであるので、谷勾配と平面形状を既知として河道の安定を捉えることが一般的に多い。

藤田⁴⁾は沖積河川の安定流路を現象的に「基本的に流路が大規模な平面変動や顕著な拡幅を生じない状態であり、河床の土砂移動に関し静的安定状態と、動的安定状態がある。(安定流路は)平面・縦断形状の安定を具備条件としている。特に平面形状が安定していれば縦断形状変化は緩慢である。交互砂州の波高が小さく、流量集中がなければ、側岸付近の局所的な土砂流送が生じないからである。」と記述している。

3. 既往研究のレビュー

国内外の主要な文献を調べた結果、沖積河道の安定な流路幅を検討した研究には、①地形学分野で流量や川幅等の実存データの関係を考察するもの、②土砂水理学的に理論的に考察するもの、③安定な河道断面に至るメカニズムとしての仮説と、連続式、抵抗則、流砂量式から解析的に考察するもの、がある(表-1)。英語のempiricalという単語は、実験あるいは観測によって得られたデータに基づく解釈(経験)という意味で用いられる。

(1) 科学的な経験に基づく手法(empirical)

19世紀のインドの灌漑水路の実データの解析以来、水

路の流量、幅、水深、勾配の経験的な関係式(レジーム概念)が数多く提唱されている。灌漑目的で水路を建設する際、縦横断方向に境界が変動しない水路設計が求められた。Laceyによる研究⁵⁾が現在もしばしば引用される。

日本では岡崎文吉⁶⁾が『治水』でDubuatのレジームという外来語に対し「平衡」と表現した。Inglisは、in regimeの水路を「年間では変動するが、1年を超えては実質的に変動しない水路」と定義し⁷⁾、Blench⁸⁾は、Regime Channelを「regimeの状態、あるいは非流体の境界を必要に応じて自己調整してequilibriumの状態を達成できる水路」と定義している。つまり年ベースの短い時間スケールの概念と考えられる。

Leopaldら⁹⁾によって、実河川のレジーム概念(河道水理幾何)が研究された。その多くは、式(1)の形で川幅、河道断面の平均的な水深・流速を流量の冪乗で表現する。

$$B = \alpha \cdot Q^x \quad h = \beta \cdot Q^y \quad u = \gamma \cdot Q^z \quad (1)$$

ここで α 、 β 、 γ は係数、 x 、 y 、 z は冪指数である。 B 、 h 、 u (流速)および Q (流量)は次元を有する。

式(1)の係数と冪指数の研究は従来、Downstream Hydraulic Geometry(以下、DHG)とAt a Station Hydraulic Geometry(以下、ASHG)の2つに分けられる。DHGは異なる河道区間における Q や B 等の関係近似、ASHGは1つの断面における Q と B (水面幅)の関係近似を求めるものである。

DHG,ASHGは共に長い時間スケールの概念である。

DHGの係数と冪指数が一般化できると河道設計に有用であるため、河岸の強度に応じて関係式を分類する研究が行われた(Blench⁸⁾,Simonsら¹⁰⁾多数)。過去提案されてきたDHGとASHGの冪指数と係数を取りまとめた論文と

表-1 安定な川幅、断面形に関する既往研究の流れ

年代	科学的経験による研究	仮説を伴う解析的研究	理論的・土砂水理学的研究	総説的文献
1910	Dubuat(18世紀 仏)			岡崎(1915)“治水”
1930	G.Lacey } 運河・水路 T.Blench } 次元量			
1940	L.Leopald & Maddock } 実河川		全断面で土砂移動なしの条件 Threshold Theory	
1950	Downstream Hydraulic Geometry At a Station Hydraulic Geometry		E.W.Lane(1953) 銭寧(USBR) F.Henderson(1961) ニュージーランド	
1960	Velikanov(ソ連) 無次元量 Simon & Albertson(1960)	H.H.Chang Minimum Stream Power	芦田・村本(1971) 平野(1973) 大型水路実験	T.Blench(1961) 杉尾(1971)
1970	Chitale(1970) 河岸強さの分類 Bray(1982)	W.White/Bettess Max. Sediment Transport	Stable Channel Paradox G.Parker(1978) 藤田(裕)(1980)	W.H.Graf(1971) 芦田ら(1975)“流路工計画”
1980	Hey and Thorne(1986) E.D.Andrews(1984)		池田(駿),Parker(1986) 山本(晃)(1988)	銭寧(1987) 吉川(1985)“流砂の水理学”
1990		エントロピー仮説 S.Cao(中国) M.S.Yalin / F. da Silva(2001)	泉・池田(1991) Vigilar/Diplas(1997)	H.H.Chang(1987) 1988 Conference “River Regime”
2000		H.Q.Huang(中国), G.Nanson(豪)	P.Julien&Wargadalam(1995)	P.Ackers(1992) 藤田(裕)(2000)
2009		R.G.Millar(加) B.C.Eaton, M.Church(加)	J.S.Lee & P.Julien(2006) 理論+仮説+検証	大同(1993,1995) 1998 ASCE TC “River Width Adjustment” Vijay Singh(2004)

して、Singh¹¹⁾がある。流量に掛かる係数は、検討された河川によってばらつきがある。その一方で、Qの冪指数については、Bに対しては0.5という値が一般的に報告されることが多い。

日本においては1.で述べたような事情によりレジーム式を提案するような検討は特になされていない。和文のレビューには杉尾¹²⁾、芦田¹³⁾による流路工の研究、藤田^{4), 14)}、吉川¹⁵⁾、山本¹⁶⁾がある。山本¹⁶⁾は、レジーム式について、「勾配、流量、河床材料の粒径が独立変数となっていない。つまり、流量が大きいところでは、勾配と河床材料の粒径が小さいという縦断方向の河道特性量の変化が含まれてしまっている」と指摘する。

(2) 無次元量による検討

流量、川幅、水深の次元量を無次元化して、係数の力学的意味を明示して河道水理幾何を検討する研究は、多く行われている。流量(m³/s)を無次元化する場合、既往の研究では、以下の2通りがある。

$$Q^{**} = Q / \sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d^5} \quad (2)$$

$$Q^* = Q / \sqrt{g \cdot I \cdot d^5} \quad (3)$$

ここでg:重力加速度(m/s²)、I:河床勾配、s:土粒子比重、d:河床材料代表粒径(m)である。勾配を含まない式(2)は、勾配が従属変数となる蛇行河川の流量一波長関係を論じる際にも採用される。式(3)は、次元解析においてg・Iを1変数として扱うことで得られるが、谷勾配としてのIを既知とした水と土砂の流下に関係した現象の検討に適していると考えられる。

式(3)を用いた研究をしているVelikanov¹⁷⁾、銭寧¹⁸⁾、福岡^{19), 20)}は各論文で、g・Iという谷勾配に起因する力が河道形成に支配的であると述べている。つまり、谷勾配が既知であるような時間スケールでの安定河道形成を捉えていると理解できる。式(2)の無次元流量は、Acker²¹⁾、池田²²⁾、泉²³⁾、Eaton²⁴⁾らによって使われている。

なお、川幅と水深の無次元化に際しては、長さの次元を持つ河床材料の粒径が用いられることが一般的である。式(3)のQ*に抛れば式(4)、(5)のようになる。

$$a(Q^*)^X = B/d = B^* \quad (4)$$

$$b(Q^*)^Y = h/d = h^* \quad (5)$$

(3) 土砂水理学的手法(theoretical)

この手法は1950年代にLane²⁵⁾によるThreshold 理論に始まる。水路側岸上に位置する粒子の限界掃流力に対する斜面の傾斜角の影響を考慮して、水平面に置かれた場合の掃流力との比が求められた。この静的平衡状態の河道断面形は「Laneの式」として水理公式集²⁶⁾に掲載されている。安息角40度の場合、B/hは3.7となる。

平野²⁷⁾は、動的に安定な河道断面において仮に河岸の斜面上で掃流砂が生じている場合、重力の効果により流砂は河道中央に移動して河道幅は更に広がるという矛盾

点を指摘した。Parker²⁸⁾はこれをStable Channel Paradoxと表現した。この問題に対し、池田^{22), 28)}、Parker²⁹⁾らは、横断面内の運動量の拡散を考慮することにより、掃流砂が卓越するような安定な河道断面形の理論研究をされた。

その特徴²²⁾は、直線礫床河川では側岸部の土砂が移動すると河岸侵食が生じるため、側岸の土砂が動かなくなるまで拡幅が生じ、河道中央での無次元掃流力は限界掃流力より少し大きい値で安定となるという点である。この理論は山本の成書³⁰⁾でも日本の多くの礫床河川で成り立つことが確かめられている。なお、河道断面中央部の動的安定な平均的な安定水深は式(6)で求められる。

$$h = 0.0376 \cdot (s-1) \cdot d / I \quad (6)$$

これによると安定な河道幅は流量のI乗に比例するとされる。また、池田²⁸⁾によると、両側岸部の幅は、河道中央部水深の4.5倍となる(安息角40度の時)。

1995年に大同³¹⁾が上述の力学的研究とレジーム式との違いを議論した他、泉³²⁾のレビューがある。海外ではVigilar・Diplas³³⁾が基本的にParkerや池田の理論に沿って、安定河道断面形の理論形が一定の範囲の実河川と良好に一致することを示している。

藤田⁴⁾は、安定流路を交互砂州の発生しない条件と側岸安定条件とが満足された状態と定義し、長方形断面の連続式とManning-Stricklerの抵抗則から、h, B, U, dをIと流量Qの関数として定式化した。その中でBがQの2/5(=0.4)乗に比例することを導出した。

$$B = \alpha_1^{7/30} \beta_1^{-3/10} \gamma_1^{2/5} [\tau_{*c}(s-1)]^{7/30} I^{-13/30} Q^{2/5} \quad (7)$$

α_1 は側岸安定条件式における掃流力比(=2)、 β_1 は(=h/d)/(B/h)²=0.05)、 γ_1 はManning-Stricklerの抵抗則における係数(=0.04)である。

さらに、藤田⁴⁾はレジーム式で言われているようにBがQの冪乗に比例する関係において、B/h(=ζ)および掃流力・限界掃流力比を一定とすると、BがQの6/13(=0.46)乗に比例することを示した。

$$B = \alpha_1^{-3/13} \zeta^{7/13} \gamma_1^{6/13} [\tau_{*c}(s-1)]^{-2/13} d^{-2/13} Q^{6/13} \quad (8)$$

Qの係数の中ではζが最も効き、粒径の効果は相対的に小さいことが分かる。藤田は式(8)により、しばしば仮定されるレジーム式が、スケールの異なる種々の流路であつてもB/hがそれほど変化しないことを意味することを指摘した¹⁴⁾。つまり安定な河道のQの冪乗とBがあるまとまった線形関係を示す場合、その河道スケールに関係なく、ある一定のB/hが存在する可能性がある。

Julien³⁴⁾らは、抵抗則に水深粒径比、横断面内の2次流を考慮してh, B, UをI, dとQの関数として定式化した。そして800ヶ所以上の実河川のデータを用いて、式の検証と確認を行っている。Bに対するQの冪指数はh/dの関数となるが、h/dの増加につれ冪指数は0.4に漸近する式となっている。

(4) 解析的手法(analytical)

海外の地形学と水理学分野では、仮説(Extremal Hypotheses)を取り入れた解析的研究が盛んである。安定な河道断面の設計にはB, h, u, Iの4つの変数が必要であるのに対し、流れの連続式、抵抗則および流砂量式という3つの条件式に加え、あるスカラー量が極値となるように河道断面が平衡になるという仮説が導入される。Chang³⁵⁾によるMinimum Stream Power仮説、White³⁶⁾によるMaximum Transport Capacity(MTC)仮説等がある。近年ではMillar³⁷⁾がTransport CapacityとStream Powerとの比の最大化という仮説を提唱している。

これら仮説を用いた安定河道断面の研究に対して、Griffiths³⁸⁾は、河道が仮説の状態に達する機構が不明確であり「幻想である」と批判する。この批判に対しEatonらの反論³⁹⁾がある。図-1と図-2は、それぞれ従来のMTC仮説、EatonらのMTC仮説による河道幅と実河川の(データはHey⁴⁰⁾の礫河道)との比較であり、前者は仮説の河道幅が小さく評価される。Eatonらは、従来のMTC(White³⁶⁾)が河道断面の河床と河岸の質を区別していないことを指摘し、新たに河道断面のせん断力分布と条件式に河岸材料の安定効果を入れた修正摩擦角を導入し、図-1の仮説河道幅が図-2のように改善されることを示した。図-3は、MTC仮説による河道幅と流砂量の関係例を示したものである。流砂量がピークを示す河道幅は、従来のMTC仮説値(実線)と河岸の修正摩擦角が40度の場合で4倍程度の差が出るが、Eatonの理論は同一水理量下の河道幅の取りうるばらつきを解析的に取り扱えることを示している。Eatonによると従来のMTCの結果は修正摩擦角が90度に近い(侵食しにくい)条件に相当する。

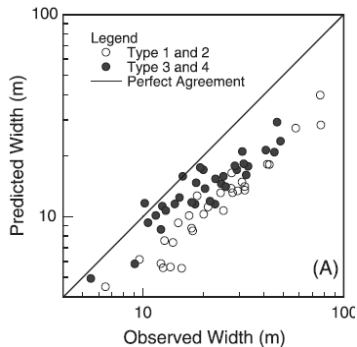


図-1 従来のMTC仮説の河道幅と実河道幅の比較³⁹⁾

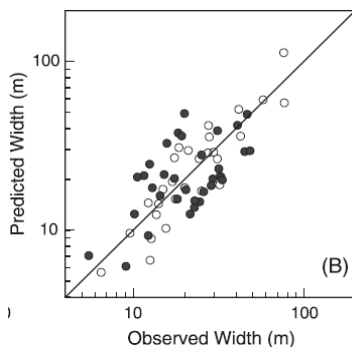


図-2 MTC仮説(河岸安定効果考慮)の河道幅と実河道幅の比較³⁹⁾

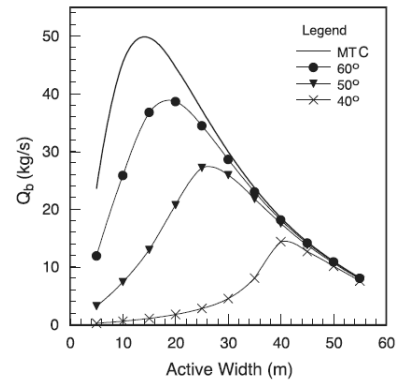


図-3 河岸強度考慮の有無によるMTC仮説の川幅の変化例³⁹⁾

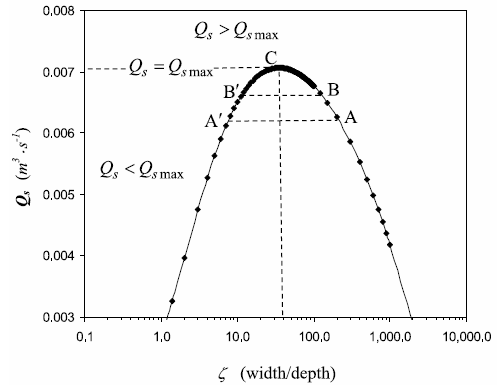


Figure 1. Variation of sediment discharge Q_s against width/depth ratio ζ ($Q = 500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $S = 0.0002$, and $d = 0.8 \text{ mm}$).

図-4 川幅水深比による流砂量の変化(図中のSIは河床勾配)⁴¹⁾

Huang・Nanson⁴¹⁾は、従来の仮説の研究では、河道断面が仮説状態に達するのは特にBの調節効果が大いことから、B/hを1変数として変数の数を減らし、B/hに着目して解析的に安定な河道断面を検討している。彼らは、掃流砂量式にMeyer-Peter & Muller(MPM)式を用いて、式(9)を導出した。

$$Q_s = K_1 \zeta^{3/8} (\zeta + 2)^{1/4} \left[K_2 \frac{\zeta^{3/8}}{(\zeta + 2)^{3/4}} - \tau_{*c} \right] \quad (9)$$

$$K_1 = 4.93 \sqrt{(s-1)gd}^{25/16} \left(\frac{Q}{7.68 \sqrt{gI}} \right)^{3/8} \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{I^{13/16}}{(s-1)d^{15/16}} \left(\frac{Q}{7.68 \sqrt{gI}} \right)^{3/8} \quad (11)$$

Q_s の単位は m^3/s 、 ζ はB/h、 τ_{*c} はMPMの式から0.047である。式(9)をある水理条件でプロットすると図-4の曲線となり流砂量が最大となる ζ_m が存在する。式(9)を ζ で微分して0と置き $\zeta = \zeta_m$ とすると、流砂量は式(12)となる。

$$Q_{s\max} = K_1 (24\tau_{*c})^{1.6} \zeta_m^{3/8} (\zeta_m + 2)^{1/4} \left[\frac{\zeta_m - 2}{\zeta_m + 78} \right]^{1.6} \quad (12)$$

この式は、 $\zeta_m = 2$ で流砂量なしの静的状態となることを示している。例えば図-4によれば $\zeta_m = B/h$ が35であるときに流砂量最大となる。同図の水理条件の実河川の河

道断面がこの B/h に近いという事実の積み重ねがあれば、安定河道の仮説の検証になるとされる。

但し式(9)~(11)は、掃流砂量式をMPMの式以外としたときは必ずしも流砂量の最大値が解析的に出ない場合もある。また図-4の水理条件によっては流砂量最大を与える $\zeta_m=B/h$ は1オーダー程度変化する。

(5) 既往研究における対象流量

レジーム概念が最初に対象とした灌漑水路はある程度一定の流量が流れるのに対し、河川はその変動が大きい。そのため、流量規模について様々提案されている³⁾。しかしほとんどの既往研究では河道満杯程度の流量規模で断面形成が論じられている。河道形成流量とその波形を取り扱った研究は多くない。安定流路の研究は地形学と土砂水理学に加え、異なる気候帯の洪水流出波形の水文的な観点からも行われるべきと筆者は考える。

4. 安定流路の川幅水深比 B/h について

藤田^{4), 14)}がかつて示唆したように、安定な河道断面の Q の冪乗と B があるまとまった線形関係を示す場合、その河道のスケールに関係なく、ある一定の B/h が存在する可能性がある。また上述のようにHuangらの仮説では、任意の Q , d , I に対して安定となる B/h が存在する考え方が示されている。

筆者は安定流路の B/h が定量的に評価できるかどうかは重要な点であると考ええる。

福岡ら^{19), 20)}が式(4),(5)の形で示した河道形成流量の Q^* , h^* , B^* の関係によると、両対数紙における B^* と h^* はほぼ平行に分布し、過去繰り返し洪水を受けてきた安定な河道断面には、河道（流量）スケールによらず、ある一定の B/h が存在することが示唆される。ちなみに B^* , h^* の各近似線の縦軸比($=B/h$)は約30~40である。

筆者は既発表⁴²⁾で式(4),(5)の両対数グラフにおける縦軸方向のばらつきを検討した。式(4),(5)の X と Y は0.4, a と b は共に B/h と流速係数の関数となることを示し、縦軸の切片である a と b は、流速係数10, $B/h=10\sim150$ の範囲で約4倍(0.4オーダー)のばらつきがあることを示した。

安定な河道断面データを収集した資料にChurch・Rood⁴³⁾がある。この資料は、各河道の平面形状分類と共に、地形図等から過去100年は安定であったと判断される河道が評価されている(表-2)。既発表⁴²⁾の検証として、この安定河道の Q^* , B^* , h^* をプロットした(図-5)結果、係数 a , b のばらつきはやはり0.4オーダー程度となった。

これは B/h にすると16倍のばらつきに相当する。Huangらの仮説による考察でも B/h に10倍のばらつきはある。 B/h の1オーダー以下の評価はまだ課題が多いと考えられる。しかし、先述のEatonらの図-3に示されているように河岸安定の条件を考慮したMTC仮説は、川幅の4倍のばらつき(0.4オーダー)を解析的に取り扱える可能性を

示している。この点は今後更に検討する価値がある。

5. 結論と川幅研究の方向性

沖積地の安定な流路幅に関する既往の研究を、その歴史的な流れ、研究手法の特徴、主たる研究者名の言及により、概説し、和文のリファレンス的な総説が得られた。

沖積河道の Q と B の一定範囲の関係は、現在なお広く認識されている。 Q の冪乗と B が比例する関係において、冪指数は一般に0.5とされるが、係数は河道毎に大きくばらつく。結果、実務の川幅設定に支障が出る。係数に内在する河道変数を挙げ、それらの土砂水理的关系を設定し、理論的に検討された結果では、 Q の冪指数は、経験的な0.5にやはり近い値になる傾向にある。800ヶ所以上の実河川に基づくJulienの理論式によると、冪指数は河床の抵抗則に關係する。

Q の係数に関しては、レジーム式型の幾何関係が種々の河道スケールに対して成立する場合、河道の安定をもたらすある一定の B/h が存在することが示唆された。近年の仮説の研究(Huang・Nanson)においても河道が平衡に向かう B/h の存在が着目されている。これとは別に河岸強度を考慮したMTC仮説は実川幅のばらつきを定量的に説明する可能性を示している。

この B/h が定量的に評価出来れば安定な河道断面が説明できるはずである。しかし、安定と評価される河道断面のEmpiricalな検討においては B , h は各0.4オーダーのばらつき、 B/h は1オーダー以上のばらつきがあると言わざるをえない。そのため、安定な河道幅の多様性をもたらす要因の定量的な説明はまだ課題が多いと考えられる。

1. で述べた今後の外力変動に対して望ましい川幅の見積りを進める上でも、筆者は本論でレビューした諸仮説も含めた理論式と、empiricalなアプローチとの比較による理論の妥当性の更なる裏付けと、海外の安定とされてきた自然河道データの継続的な安定性評価により、海外河川の比較の視点が有用であると考えられる。

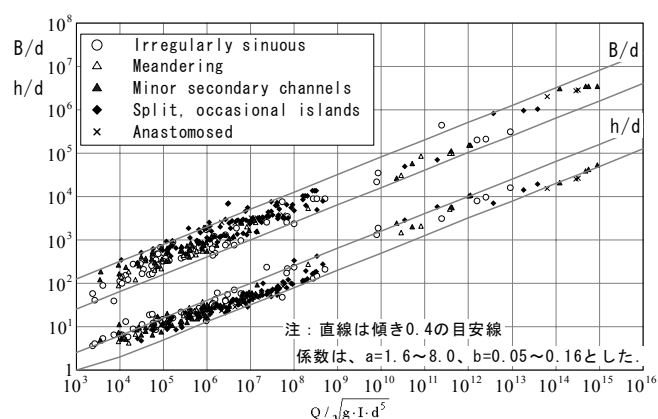


図-5 Church・Rood の安定河道データの Q^* , B^* および h^* の関係

表-2 Church・Rood の安定河道データ(総数257)

	流量(m ³ /s)	水深(m)	水面幅(m)	河床勾配	河床材料粒径(mm)
最大	16696	11.18	881	0.0416	190
最小	0.4	0.2	2	0.00004	0.22

謝辞：本論文に関して、貴重な助言とコメントを下された先生方と匿名の査読者の方々に心より感謝いたします。

参考文献：

- 1) 中川博次，辻本哲郎：移動床流れの水理，新体系土木工学第23巻，1986.
- 2) 水工学委員会基礎水理部会：安定河道の流路幅について，2010年度基礎水理シンポジウム配布資料，2010.
- 3) Knighton, D.: *Fluvial Forms & Processes*, Arnold, 1998.
- 4) 藤田裕一郎：沖積河川の流路変動に関する基礎的研究，5章4節，京都大学博士論文，1980.
- 5) Lacey G.: Flow in Alluvial Channels with Sandy Mobile Beds, I.C.E. paper No.6274, pp.145-164, 1957.
- 6) 岡崎文吉：治水，丸善，pp.210，1922.
- 7) Graf W.H., *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw Hills, 1971.
- 8) Blench, T.: *Mobile bed Fluviology: A regime theory treatment of canals and rivers*, The University of Alberta Press, 1969.
- 9) Leopold, L.B., Maddock, T.: The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications, USGS Professional Paper 252, 1953.
- 10) Simons, D.B., Albertson, M.: Uniform Water Conveyance Channels in Alluvial Material, ASCE HY.86-5, pp.33-71, 1960.
- 11) Singh, V.P.: On the Theories of Hydraulic Geometry, Intl. J. of Sediment Research 18-3, pp.196-218, 2003.
- 12) 杉尾捨三郎：移動床の抵抗法則，水工学夏期研修会，1971.
- 13) 芦田和男，高橋保，水山高久：流路工計画に関する水理学的研究，新砂防第97巻，1975-11.
- 14) 藤田裕一郎：移動床水理現象のとりえ方 研究の展開と成果の適用，土木学会水工学シリーズ00-A-5，2000.
- 15) 吉川秀夫：流砂の水理学 第12章，丸善，1985.
- 16) 建設省土木研究所：河道特性論，土木研究所資料第2662号，1988.
- 17) Velikanov, M.A.: *Fluvial Process (ロシア語)*, Fizmatgiz, 1958.
- 18) 銭寧，張仁，周志德：河床演变学(中国語)，北京科学出版，1987.
- 19) 福岡捷二：治水と環境の調和した治水適応策としての河幅，断面形の検討方法，河川技術論文集第16巻，2010.
- 20) 福岡捷二：流域から見た河川の望ましい川幅・断面形—自然河川に学ぶ，第140回河川文化を語る会講演資料，2010.1.26.
- 21) Acker, P.: Meandering channels and its influence of bed material, *Gravel-bed Rivers*, John Wiley & Sons Ltd, pp.389-422, 1982.
- 22) 池田駿介，Parker, G.ら：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号，pp.117-126, 1986.
- 23) 泉典洋，池田駿介：直線砂床河川の安定横断河床形状，土木学会論文集，第429号，pp.57-66，1991.
- 24) Eaton, B.C., Church, M.: Predicting downstream hydraulic geometry: A test of rational regime theory, *J. Geophysical Res.* Vol.112, F03025, 2007.
- 25) Lane, E.W.: Design of Stable Channels, *Trans. ASCE*, pp.1234-1260, 1953.
- 26) 土木学会：水理公式集 第3編 昭和60年度版，1985.
- 27) 平野宗夫：拡幅を伴う流路変動について，土木学会論文集第210号，pp.13-20, 1973.
- 28) 池田駿介：詳述水理学 第13章，技報堂出版，1999.
- 29) Parker, G.: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 1&2 The sand-silt river & The gravel river, *J.Fluid Mech* Vol.89, pp.109-146, 1978.
- 30) 山本晃一：沖積河川 -構造と動態- 第6章，技報堂出版，2010
- 31) 大同淳之：河川の安定横断河道形，水工学論文集第39巻，pp.633-640，1995.
- 32) 泉典洋：河川の土砂輸送と地形形成，土木学会水工学シリーズ04-A-7，2004.
- 33) Vigilar, G.G., Diplas, P.: Stable Channels with Mobile Bed, ASCE HY.124-11, pp.1097-1108, 1998.
- 34) Julien, P., Wargadalam, J.: Alluvial Channel Geometry: Theory and Applications, ASCE HY.121-4, pp.312-325, 1995.
- 35) Chang, H.H.: *Fluvial Processes in River Engineering*, Krieger, 1988.
- 36) White, W.R., Bettess, R., Paris, E.: Analytical approach to river regime. *J. Hydraul. Div.* 108 (HY10), pp.1179-1193, 1982.
- 37) Millar, R.G.: Theoretical regime equations for mobile gravel-bed rivers with stable banks, *Geomorphology* 64, pp.207-220, 2005.
- 38) Griffiths, G.A.: Extremal hypotheses for river regime: an illusion of progress, *Water Resour. Res.* 20(1), pp.113-118, 1984.
- 39) Eaton, B.C., Millar, R.G.: Optimal alluvial channel width under a bank stability constraint, *Geomorphology* 62, pp.35-45, 2004.
- 40) Hey, R.D., Thorne, C.R.: Stable channels with mobile gravel beds, *J. Hydraul. Div.* 112 (HY8), pp.671-689, 1986.
- 41) Huang, H.Q., Nanson G.: Why some alluvial rivers develop an anabranching pattern, *Water Resour. Res.* 43, W07441, pp.1-12, 2007.
- 42) 井上和則：安定な河道断面・断面形の既往研究の概観と実河川の流量・川幅・水深関係の一考察，水工学論文集第55巻，pp.787-792，2011.
- 43) Church, M., Rood, K.: Catalogue of Alluvial River Channel Regime Data, Dept. of Geography, Univ. British Columbia, 1983.

(2011. 5. 19受付)