

河川堤防の水工学機能評価の必要性和 その見える化

HYDRAULIC FUNCTIONS OF THE RIVER LEVEE SHOULD BE VISIBLE AND ACTIVE IN THE SOCIETY

福岡捷二¹
Shoji FUKUOKA

¹フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

Researches of river levees have been constructed by placing emphasis on the shape from the view of foundation engineering such as the height and width because of long construction history and massive length. Therefore, consideration from hydraulic engineering on levee design has not made sufficiently in spite of the important river facility. The author pointed out that hydraulic and river engineering researches have hardly paid attention on the presence of levees and researchers in the field of foundation engineering and hydraulic engineering have to cooperate for the establishment of safe levee design.

The paper shows by examples that the presence of levees must always be considered in researches and management of rivers and hydraulic functions should be visible and active in the society, because all hydraulic phenomena in rivers are regulated by levees.

Key Words : levee, flood flow, dimensionless river width and sediment transport, visible and active technology

1. 序論

安全で環境豊かな河川づくりのためには、社会、経済の変化に対応した河川技術の進展を図り、その成果を技術基準や制度化し、適切に河川管理や維持管理を行うことが求められている。国土交通省による2005年の河川砂防技術基準「計画編」、2010年の「維持管理編」の出版、2012年の「調査編」の出版（予定）は、そのような技術の方向性を示すものである。総合的な河川管理の実施および多発する河川災害への備えのためには、さらなる技術開発と技術指針、制度の整備が求められる。

1990年以降、洪水流に関する研究は進展して来た。その理由は、河川基本方針、河川整備計画等の計画づくりの進展や維持管理の必要性から、質の高い洪水観測データが得られるようになり、それらのデータを用いた実用的な数値解析モデルが解析ツールとして確立してきたことにある。

このように洪水流に関する技術の進展は見られる一方で、重要な河川施設である堤防については、地盤工学上の安定な「堤防の形」に関する研究が中心で、洪水流れが堤防に与える、または、堤防が洪水流に与える水工学からの堤防の技術研究は極めて少ない。堤防の存在することが堤防と堤防の間の流れの構造、洪水流の伝わり方、土砂の輸送量や河床の形状等河道内の流れの構造を支配し、逆に、河道内

の流れが、安定な堤防の構造決定に関係しているという見方に基づく堤防研究が少ないのが現状である。

2. 河川堤防調査研究の問題提起

著者は、堤防技術は、地盤工学を中心とする「堤防の形」の研究と水工学を中心とする「堤防に係る流れ」の研究が一体的かつ総合的に行われるべきものであり、これまでの堤防研究には、この視点が欠けていることを指摘した¹⁾。これには2つの理由が考えられる。第一は、堤防そのものの調査研究を行う場合を除いて、水工学研究者、技術者は、河川堤防が既に設置されているという前提で河川の調査、研究を行っていることと関係している。もちろん堤防がなかったならば、ある水位に達すると水があふれ、これを防ぐことが堤防の持つべき最も重要な機能であることを認識しており、近年、堤防からの越流に関する研究数は、増加している²⁾。しかし、堤防から溢れない状況においても、堤防を強く意識した研究は多くない。堤防の役割は、堤防と堤防の間の河道に水を集め、下流に安全に導くことである。この堤防の役割が、流れや土砂の移動等の水理現象を概ね決めており、このため堤防は、河川の調査研究で常に意識されなければならない対象物である。第二は、我が国の河川水理学研究が、実験水路を用

いた研究からはじまったことと関係している。両側を壁で仕切られた狭い水路では、幅の広い河川で起こる各種水理現象と対比させるために、水路中心部の水理現象を調べることが主要な課題であった。その考え方が今なお残っており、特に、水理学的手法に基づく解析的研究の場合には、壁の存在の重要性を直接的に考慮することは極めて少なく、これでは、河道の水理現象を正しく解いたことにはならないと考える。

最近では、河川の流れや土砂の移動を検討するのに、数値解析手法が用いられる。数値解析では、堤防、河岸は、境界の形として事前に取り込み、後は計算で現象の解析を行うことになる。しかし、このことは、著者の主張する堤防や河岸を取り込んだ分析を行っていることを意味していない。著者が言いたいことは、数値解析から得られた結果を、そのまま答えとしてしまうのではなく、堤防や、河岸の線形、河道断面形等の境界形状の変化が、どのように計算結果に表れているか、特に、移動床の場合は、壁際で何が起きているのか、結果の物理的な意味を読みとり、それを河川の管理や、計画に活用しようとする認識を持つことが必要である。二次元平面解析法が、幅の広い河道流れの解析法として有力であるが、重要な壁際の水理現象の検討法としては不十分である。これは壁があることによる複雑な局所流れには適切な解析法とはいえず、内田、福岡³⁾による浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法が必要となる。

ある河道条件や流量条件に対し、河川の最も重要な施設である堤防や河岸の存在が、流れの水面幅や水深、流速分布、土砂の輸送等にどのように影響を及ぼしているかを、堤防や河岸の特性との関係で、定量的に見直すことが必要である。堤防は線形的土構造物であることから、地盤工学的に見た「堤防の形」が堤防の主要な研究課題になっている。線形的構造物である連続した堤防は、河道の縦・横断面形を決めており、洪水流の流れや土砂移動といった水理現象を規定している。これまで、堤防と堤防の間の河幅全体の水理現象を扱う研究は行われているものの堤防との関係での議論は少なく、むしろ、低水路内の流れと土砂移動、堤防護岸の設計や河岸浸食軽減といった局所的な水理検討が目立っている。堤防の技術検討は、地盤工学と水工学の両面から線形的構造物としての特徴を考慮した時空間的な広がりをもって総合的に検討されなければならない。

本総説では、研究のゴールである両者を総合化した堤防技術については、今後の検討課題とし、著者の提起した課題である堤防線形が規定する河幅や断面形の縦横断変化が洪水流や土砂輸送にどのような量的関わりを有しているのかについて議論する。

3. 堤防、河岸の法線形、河道断面形と洪水流の水位ハイドログラフ、流量ハイドログラフ

の伝わり方の見える化

河川の治水上の安全性は、洪水位と堤防高の相対的な高さ関係で語られることが多い。堤防は土を材料として作られているため、越流に対しては壊れやすい構造物である。このため、河道を流下する洪水流の水位縦断面形は正しく見積もらなければならない。定常な流れにおいて河道断面形が決まっていれば流量と水位の関係はほぼ一義的に決まる。しかし、洪水流では、河道断面形の縦・横断変化に起因して、洪水流の河道貯留が起こり、流量、水位が流下方向に複雑な逡巡の仕方をする。

洪水流が一樣な河道を伝わる時には、水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの変形は小さく Kinematic wave の特性を持つと言われている。しかし、河岸や堤防線形の変化により、河道の平面形、断面形は縦断的に変化する。そのような河道に洪水流が流入してくると、洪水流の時間変化と河道構造の変化によって、水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの伝わり方に違いが現れる。

一次元的な河道における洪水流の水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの波形の伝わり方の違いを竹村・福岡⁴⁾の力学的考察から示す。無次元化された非定常次元の連続式と運動方程式は、それぞれ式(1)、式(2)で表わされる。

$$\frac{\partial A^*}{\partial t^*} + \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} = 0 \quad (1)$$

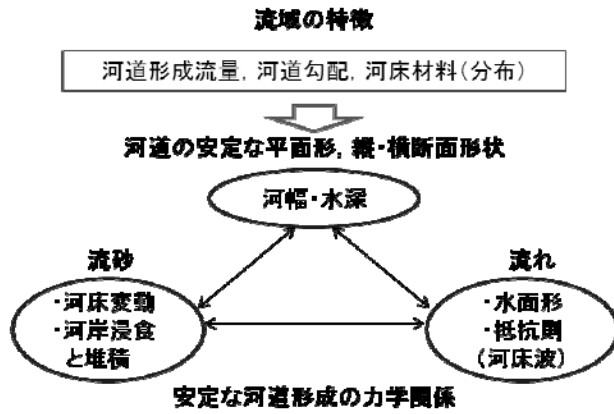
$$\frac{\partial U^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} = -\frac{1}{F_0^2} \left[\frac{\partial A^*}{\partial x^*} - \frac{A^*}{B^2} \frac{\partial B^*}{\partial x^*} - \frac{F_0^2 g}{i_0 C^2} \frac{U^{*2}}{R^*} + 1 \right] \quad (2)$$

ここに、 Q : 流量、 A : 流水断面積、 H : 水位、 g : 重力加速度、 R : 径深、 C : Chezy 係数、 $\partial H / \partial x = \partial(A/B) / \partial x - i_0$ (B : 水面幅、 i_0 : 河床勾配) で、添え字0を付けた量は各水理量の代表値、*を付けた量は各無次元量、 $A = A_0 A^*$ 、 $B = B_0 B^*$ 、 $R = (A_0/B_0) R^*$ 、 $U = U_0 U^*$ 、 $x = A_0 / (B_0 i_0) x^*$ 、 $t = A_0 / (B_0 i_0) t^*$ 、 $Q = (A_0 U_0) Q^*$ 、 $F_0 = U_0 / \sqrt{g A_0 / B_0}$ である。式(1)、式(2)を変形、整理することで、洪水流の水位、流量の伝播を表す無次元基礎式である式(3)、式(4)が得られる。

$$\frac{\partial A^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial A^*}{\partial x^*} = -A^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} = A^* \frac{\partial U^*}{\partial t^*} \quad (4)$$

流量の変化は、式(4)の右辺項の断面平均流速の時間偏微分により表わされ、この項は運動方程式を介して力学的に決定される。式(4)の運動方程式を用い式(3)の左辺を変形し、式(4)の右辺と同じ形にすると式(5)になる。



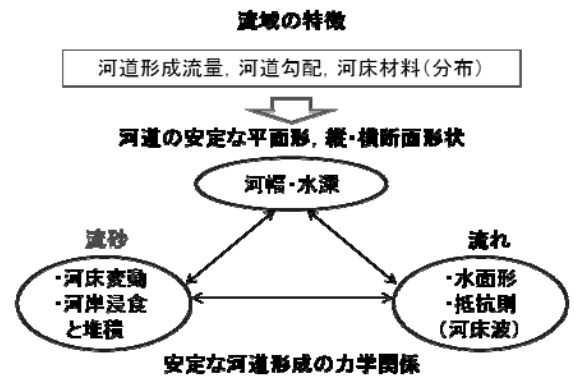
河道断面形状を規定する物理量

Q : 流量, B : 水面幅, h : 水深, I : 勾配,
 d_r : 河床材料の代表粒径, g : 重力加速度,
 ρ : 水の密度, σ : 河床材料の密度

$$f(Q, B, h, I, d_r, g, \rho, \sigma) = 0$$

$$\phi_1 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}}, \frac{B}{d_r}, \frac{h}{d_r}, I, \frac{\sigma}{\rho} \right) = 0$$

図-1 河幅・水深を規定する無次元量の導出と無次元河幅・水深決定機構⁵⁾



$$Q_B = f_2(Q, B, h, I, d_r, g, \rho, \sigma)$$

次元解析

$$\frac{Q_B}{\sqrt{g I d_r^5}} = \phi_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}}, I, \left[\frac{B}{d_r}, \frac{h}{d_r}, \frac{\sigma}{\rho} \right] \right)$$

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}} \right)^{0.40} \quad \frac{h}{d_r} = 0.13 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}} \right)^{0.38}$$

$$\frac{Q_B}{\sqrt{g I d_r^5}} = \phi_3 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}}, I \right)$$

図-2 掃流砂量を規定する無次元量の導出と無次元流砂量式⁵⁾

$$\frac{\partial A^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial A^*}{\partial x^*} = \frac{A^*}{U^*} \left[\frac{\partial U^*}{\partial t^*} + \frac{1}{F_0^2} \left(\frac{\partial A^*}{B^* \partial x^*} - \frac{A^*}{B^{*2}} \frac{\partial B^*}{\partial x^*} + \frac{F_0^2 g}{i_0 C^2} \frac{U^{*2}}{R^*} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

流水断面積の変化には、式(5)から、右辺括弧内第一項の断面平均流速の時間偏微分に加え、第二項～第五項が加わることで、複雑な河道構造の河川では、流水断面積は流量に比べ、断面変化の影響を受けやすく、その程度は洪水の各流量段階毎で異なる。河道形状が縦・横断的に変化する河川においては、式(3)、式(4)の形が示すように流量変化は水位変化と対応しない。一様な矩形断面を想定し、洪水流を準定常流・擬似等流と仮定すると、式(3)、式(4)はKinematic waveの基礎式となる。Kinematic waveを仮定した場合と断面平均流速が時空間的に変化しない場合のみ、水位(流水断面積)と流量ハイドログラフの変形・伝播は一致する。

さらに竹村・福岡⁴⁾は、水位と流量の伝播の違いをもたらす河道と洪水流れに関する量を組み合わせ

た新しい指標として洪水遊水量を定義し検討している。式(4)では、断面平均流速で移動する座標系から見た場合、流量変化は、断面平均流速 U の時間に関する偏微分に規定され、 $\partial U / \partial t$ が正の場合に流量は大きくなり、負の場合に小さくなる。

X_0 断面とその下流に位置する $X_0 + \delta X$ 断面の間を検討区間とした時、 X_0 断面における時刻 t_0 の流量が、 $X_0 + \delta X$ 断面に到達するまでに生じる流量変化量 δQ は、式(4)より

$$\delta Q = \int_{t_0}^{t_0 + \delta t} A(X(t; X_0, t_0), t) \frac{\partial U(X(t; X_0, t_0), t)}{\partial t} dt \quad (6)$$

となる。ここに、 $X(t; X_0, t_0)$: 時刻 t_0 に X_0 断面にある流体の時刻 t における存在位置である。また、 δt は時刻 $t=t_0$ に X_0 断面にある流体が検討区間を流下する時間である。検討区間における増水期の洪水貯留量のうち、式(6)で定義する流量変化量 δQ が負となる(すなわち、検討区間で流量が低減する)時間帯の貯留量を洪水遊水量 R_s と定義している。この指標を用いて、北上川、江の川の山間狹隘河道を伝わる洪

水流の水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの伝播，変形を説明している⁴⁾。

水位は，流量に比べ観測が容易であり，分かりやすい量であることから水防や避難の指標として使われ，洪水流の伝播は，観測水位を基に議論されることが多い。しかし，洪水流は流域に降った雨が河道を流下し水と土砂を運ぶ物質輸送現象であることから，流量ハイドログラフの伝播についても水位と一体的に議論する必要がある。

これは，河川の堤防や河岸の線形，河道断面形等が洪水の伝わり方を規定し，施設の計画，管理を含む川づくりにとって重要であることを示している。洪水流の水位と流量ハイドログラフの伝わり方が異なることは，洪水調節施設のオペレーションの仕方や，複数の洪水調節池の配置や作り方，水防体制のあり方にも関係する。また，河道内に存在する樹木群や砂州は，河道の縦横断面形を変化させ，その結果洪水の流れ方に影響することから，その場所の水位，流量ハイドログラフのみならず下流の洪水流量や水位伝播に与える影響を評価し，これらを見える化することによって説明力の高い適切な河川管理，今後の川づくりを進めていかなければならない。

4. 堤防法線形による河幅，縦横断面形等と土砂移動量の関係の見える化

自然豊かな河川とは，広い河幅の中を豊かな量の水が流れている姿であろう。このように河幅と流量は河川の代表的な指標であり，河道の設計上特に重要であるにもかかわらず，両者の関係が本格的に議論されないのはなぜであろうか。これも堤防の議論と同じで，河幅は与えられているものとして調査研究を行うからであろう。しかし，地球温暖化，河川災害多発時代を迎えて治水の適応策を検討していくうえで，河幅，流量の関係がどのように決まるのか避けては通れない主要な課題である。

この本質的な課題に対して，福岡ら^{5), 6), 7)}は，沖積地河川の安定な河道形状，河道幅は，**図-1**に示す流域の特徴を表す河道形成流量，河道勾配，河床材料（粒度分布）に支配されると考え，次元解析により河川の無次元河幅，無次元水深は流域の河道形成流量，河川の地形特性量に関係する無次元流量により，式(7)，式(8)で表現できることを示した。

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}} \right)^{0.40} \quad (7)$$

$$\frac{h}{d_r} = 0.13 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}} \right)^{0.38} \quad (8)$$

河道形成流量は，沖積河川の河幅，断面積を規定

する流量であり，それより大きな流量が流下すると，河道には新たな河幅，水深がもたらされ，その時の流量は河道形成流量となる。我が国の河川は，改修途上であることから，流下能力を上回る洪水流量が容易に発生する。このとき河道を流れる最大洪水流量は河道形成流量となり，河岸浸食，河床高変化に伴い川幅，水深が変化する。この時の無次元河幅，無次元水深に対する無次元流量の関係も式(7)，式(8)で表現できることが示されている⁶⁾。

さらに，福岡ら⁸⁾は，無次元河幅，無次元水深が決まれば**図-2**に示す機構で，掃流土砂移動量も決まるとの考えのもとに，日本および海外の河川で観測された掃流砂量の現地観測データを用い，次元解析によって河幅，断面形状の影響を考慮し，実河川に適用可能な無次元全掃流砂量式(9)，無次元単位幅掃流砂量式(10)を導いた。

$$\frac{Q_B}{\sqrt{g I d_r^5}} = 0.02 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}} I \left(1 - \frac{I_c}{I} \right) \right) \quad (9)$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{g I d_r^3}} = 0.02 \left(\frac{q}{\sqrt{g I d_r^3}} I \left(1 - \frac{I_c}{I} \right) \right) \quad (10)$$

図-3，**図-4**は，それぞれ，福岡の無次元河幅の式，無次元水深の式に対する自然河川と移動床水路実験で測られたデータをプロットし式(9)と対比して示したものである。実験水路の無次元水路幅は，自然河川の無次元河幅よりやや低い値を示している。これは，自然河川は，流量に応じて河幅が拡幅可能であるのに対し，固定幅の移動床水路では，流量が増加しても水路幅は変化しないために，その分，水深が大きい断面形状をとることを示している。このことは，移動床実験水路の掃流力（単位面積当たりのせん断力）は，実河川に比して大きくなる。**図-5**に，水路実験データと式(9)の関係を示す。実験データは，上述の理由により図中の式(9)に比べ傾きが若干大きく，現地観測データに比べ掃流砂量が大きくなっている。

以上の結果は，河川の堤防と移動床実験水路の側岸が，流れの水理量や流砂量などに与える影響が異なり，水路実験結果を有堤河川の無次元河幅や無次元土砂移動量，河床変動の解釈に用いる場合には注意が必要である。水路実験で見出された結果が河川の結果と同様な解釈を与え得るのかについては，水路幅等スケールとの関係で考察が必要である。このことは，堤防の役割と河川の河幅決定機構の見える化が，基本的な課題であることを示している。

5. 治水と環境の調和した川づくりのための堤防の役割とは

堤防の存在は，生物が河川域と陸域の間を通過す

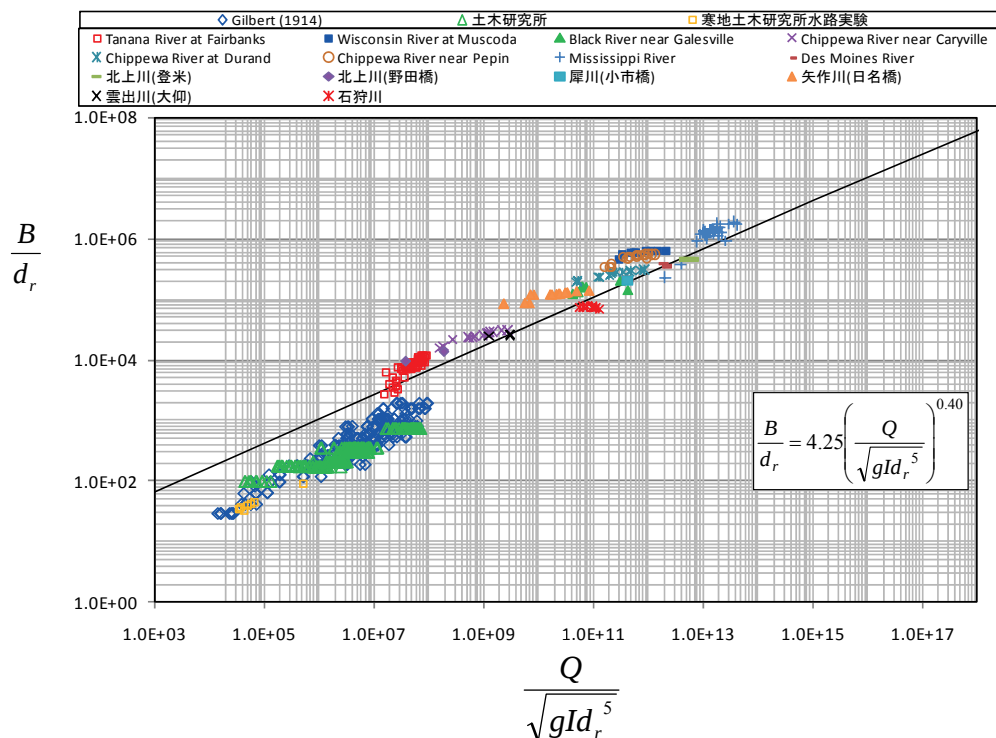


図-3 無次元流量と無次元河幅の関係⁸⁾

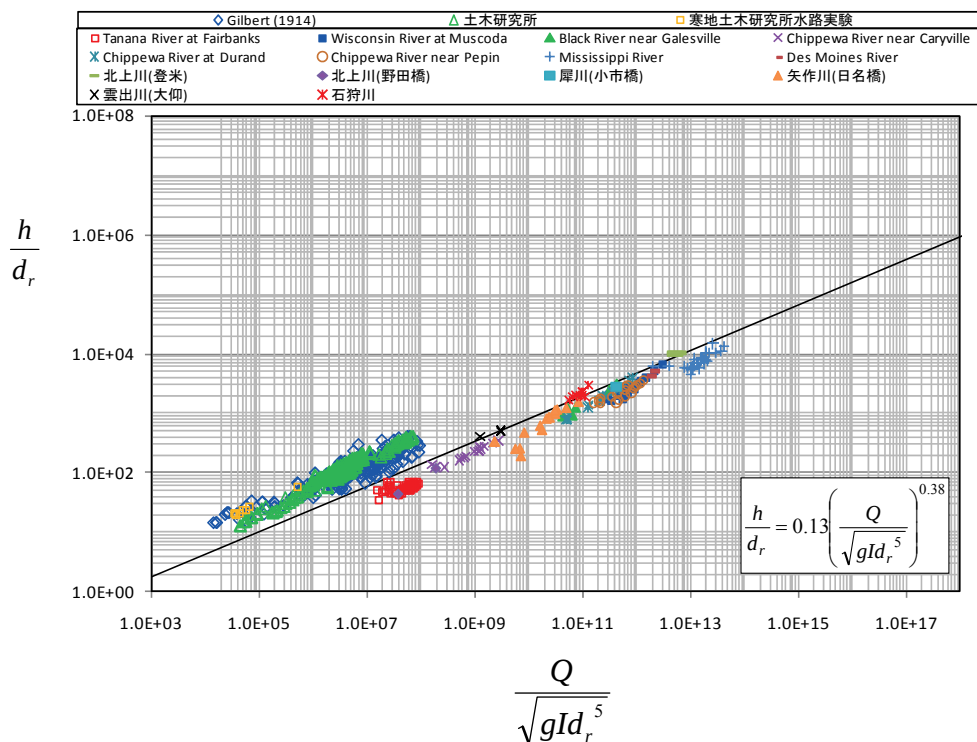


図-4 無次元流量と無次元水深の関係⁸⁾

る際の障害となるが、氾濫域に発展した我が国の都市の宿命から、堤防は治水に必要不可欠な河川施設である。河川は多くの生物の生息、生育、繁殖の場、都市域においては自然性の高い場を提供している。また、河川は堤防の存在によって、低水から高水まで治水と環境の両面から重要である。しかし現実には、洪水時の河川環境は、低水時ほど注目を受けて

いるようには見えない。しかし、洪水攪乱が生物の生活史にとって重要であること、河道内の底質の状況が、個々の河川に固有の生物の生存、活動にとって重要であり、これらには洪水の大きさと頻度が関係していることが明らかにされている。

地球温暖化時代の河川にあっては、治水と環境の調和が一層重要となるが、堤防と河岸を治水と環境

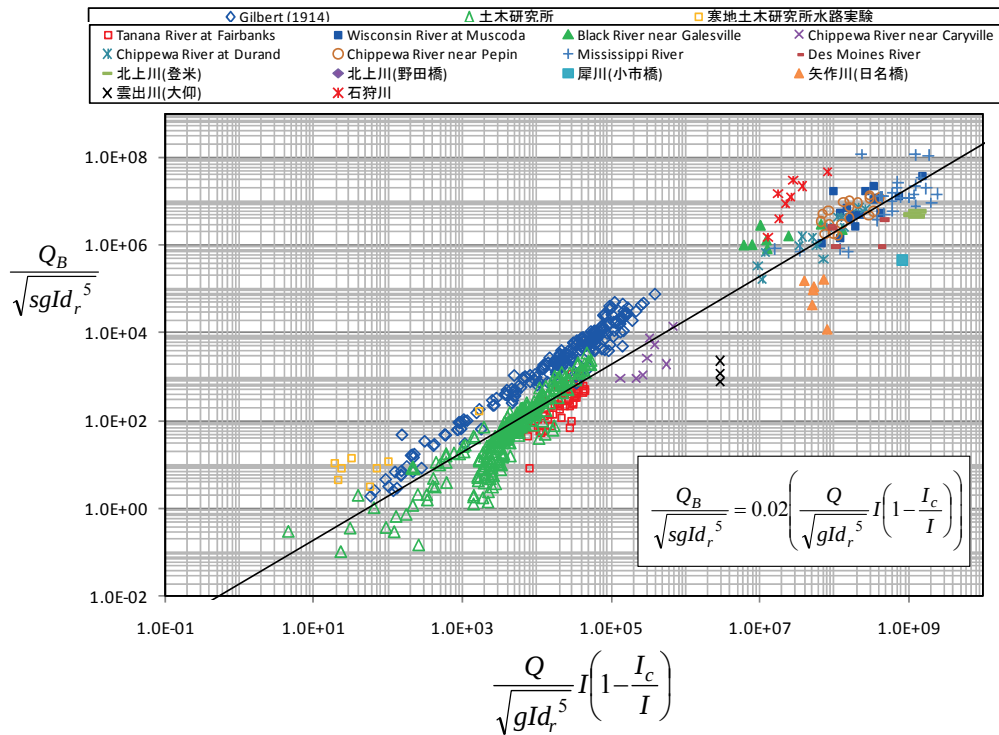


図-5 無次元掃流砂量－無次元流量の関係⁸⁾

の両面から一体的に意味づけ、これを社会の貴重な財産として適切に管理していくには、人々に分かりやすい多自然川づくりの計画とその見える化をどのように進めていくかは、真に喫緊の課題である⁵⁾。

6. 結論

河川の最も重要な施設である堤防は、河幅や断面形等を決める主要因であり、これはまた、河川で起こる洪水の伝播、流砂量等、種々の水理現象に影響を与えることになる。本文では、堤防の持つ水工学機能の重要性を考察、評価し、堤防技術の調査研究に対するこれまで行われてきた水工学研究の課題を整理し、堤防が存在することを意識した調査研究、その見える化の必要性を述べた。具体的検討として、堤防の存在が、洪水流の水位ハイドログラフ、流量ハイドログラフの伝播機構にどのような差をもたらすかを一次元基本式に基づいて示した。また、堤防や河岸の掃流土砂移動量に及ぼす役割を、現地河川と移動床実験水路での掃流流砂量観測データの特性の違いに基づき示した。最後に、河川環境の調査研究が平水時に偏りがちな状況に対し、洪水時の河川環境も同様に重要であり、特に治水と環境の調和した多自然川づくりにふさわしい堤防のあり方、考え方の構築が必要で、そのために堤防に関する新しい視点、堤防機能の見える化の必要性を述べた。

参考文献

- 1) 福岡捷二：巻頭言、これからの河川の維持管理

に望むこと―課題解決に向けて何が必要か、河川。pp. 3-7, 2011.

- 2) 島田友則，横山 洋，平井康幸，三宅 洋．千代田実験水路における越水破堤拡張メカニズム，河川技術論文集，第16巻，pp. 263-268, 2011.
- 3) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法，水工学論文集，第56巻，pp. 1225-1230, 2012.
- 4) 竹村吉晴，福岡捷二：洪水流の流量と水位ハイドログラフの変形・伝播に及ぼす河道構造の影響―山間狭隘河道を対象として，土木学会論文集B1，Vol. 68，No. 1，pp. 35-54，2012.
- 5) 福岡捷二：招待論文，温暖化に対する河川の適用技術のあり方―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，F. Vol. 66 No. 4，pp. 471-489, 2010.
- 6) 浅野文典，福岡捷二：沖積地河川における安定な川幅・水深－治水と環境の調和を目指した河道断面の決め方，水工学論文集，第54巻，pp. 1021-1026, 2010.
- 7) 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，pp. 5-10, 2010.
- 8) 浅野文典，福岡捷二：河幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式の導出とその適用性に関する研究，水工学論文集，第55巻，pp. 793-798, 2011. (2012. 4. 5 受付)