

招待論文

温暖化に対する河川の適応技術のあり方ー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

RIVER ENGINEERING ADAPTATIONS AGAINST THE GLOBAL WARMING
- TOWARDS GENERALIZATION OF CLOSE-TO-NATURE RIVERS福岡 捷二¹

Shoji FUKUOKA

¹ フェロー 中央大学理工学部特任教授, 中央大学研究開発機構教授
(〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp**Key Words** : *global warming, adaptation technology, close-to-nature river, river management, dimensionless river width, depth and rate of bed load, Fukuoka equation*

本論文では、最初に、平成 16 年四国に上陸した 6 回の台風がもたらした水災害を事例に、河川整備とともに、維持管理の重要性を示している。次に、明治時代の自然状態の利根川とカナダの自然河川、および我が国一級河川の基準地点のデータ等を用い、次元解析から導かれた河川の無次元河幅、無次元水深と無次元河道形成流量の間に成立する力学関係式が、治水と環境の両面から望ましい川づくりと河川管理の指標となること、船底形断面形が望ましい横断面形であること、無次元河幅、無次元水深等が決まる力学関係の中で無次元掃流砂量も決まること、これらの関係式が多自然川づくりにおいて重要な役割を果たすこと、を示している。最後に、地球温暖化時代に向かい、治水、利水、河川環境を総合した多自然川づくり計画の普遍化の方向性について議論している。

1. まえがき

我が国では、梅雨時や台風時には、毎年のように全国いたるところで水災害、土砂災害が発生し、人命、財産が失われている。地球温暖化による気候変動によって、雨の降り方や降雨の時間的・空間的分布特性が変化し、洪水流量が大きくなり、それに伴って、水災害、土砂災害が強大化することが予想されている。将来の地球環境の変化に伴う気候変動に対し、国土づくりから見た治水はどのようにあるべきかの検討が急がれている。

気候変動により計画を超える降水量が発生すると、計画の河道が完成したとしても河道から洪水流があふれ、人々の居住する地域は氾濫被害を蒙る可能性が高い。現実には、我が国の河川は、計画高水流量を流下させることが可能な断面ができていない整備途上の河川がほとんどであり¹⁾、整備レベルを超える洪水流量に対してはいつでも洪水氾濫は起こりうる。したがって、ある洪水流量レベルから起こる洪水氾濫に対し生命、財産を守る最も効果の高い手段は、堤防などの治水施設によるものである。このため、まずは現在の治水計画レベルの流量を流下できるように整備することが重要である。

地球温暖化による気候変動によって、洪水流量が増え、堤防から水があふれそうになり、住民を避難させるべきかどうかといったぎりぎりの状況がこれまでとは格段に多い頻度で起こると予想されている。河川改修には、長い時間がかかることから、河川整備途中の状況が長く続く。このような段階における治水施設の洪水外力に対する強さや、危険度を常に技術的に分析できなければならない。具体的には、大洪水に対する堤防の安全度の評価や、河道内に存在する樹木群の影響、河道の平面形や、横断形など河道の作り方の影響などが見積もれなければならない。これらについては、現在でも十分把握しきれていない状況を考えるとき、市民への洪水時の正しい情報の提供には困難が伴う。技術の蓄積と情報の把握に一層の努力を傾ける必要がある。そのためには、治水施設のこれまでのストックの上にとって、社会の構造や、住民の意識の変化を十分踏まえて長期的に考えた治水施設整備を着実に進めることが基本になければならない。

地球温暖化に伴う我が国の 100 年後の年最大日降水量の変化率は、地域によって異なるが現在の年最大日降水量の 1.06 倍から 1.24 倍になると推定されている²⁾。現行の治水計画に基づく河道ができて、この流量増分は流域での氾濫を助長することになる。直轄河川に

対しては、今後、治水施設の整備と土地利用を考慮した水害リスクの検討、地域とのリスクコミュニケーションを持ちながら水害に強い街づくり、危機管理対策を一体として治水適応策を考えていくことになる²⁾。

2. 平成 16 年日本を襲った 10 回の台風上陸から学んだこと

平成 16 年は日本に台風が 10 回も上陸した。これまでの年間台風上陸数の最高記録 6 回を倍近くも更新し³⁾、死者・行方不明者 93 人、うち 87 人もの人が亡くなった。その原因が、異常な豪雨が主たる原因であることは確かである。この年、四国では 7 月から 10 月の間に 6 回の台風が上陸し、そのうち 4 回の台風が多大な影響を与えた⁴⁾。吉野川の基準点岩津の平均年最大流量は、7400 m³/s であるが、4 回の上陸台風時の最大流量は、台風 10 号の 9600 m³/s、台風 16 号の 13600 m³/s、台風 21 号の 11000 m³/s、台風 23 号の 16400 m³/s とこれを超えるものであった。我が国の治水計画の基本となる洪水調節施設による調節流量や河道配分流量は、計画の対象とする洪水が一過的に発生することを前提としている。しかしながら、平成 16 年の洪水群は、1 年間に連続した大洪水がいつでも起こりうることを示すものであった。この洪水群がもたらした災害は、地球温暖化による洪水の強大化と頻度の増大がもたらすと予想される水災害・土砂災害に備える上で、重要な教訓を与えていると思われる。

(1) 大河川で何が起こったのか

吉野川流域に上陸した 4 回の洪水において、水位の縦断分布の時間変化、すなわち水面形の時間変化の詳細な観測が行われた。一方、河床高の測量は 4 回の洪水後に実施された。4 回の洪水で観測した水面形の時間変化を用いて、洪水流と河床変動の一体的解析を行い、4 回の洪水後の結果としての河床高の横断測量結果との照合を行うことで、この 4 回の洪水中に河床で起こっている現象を推定することができる。この解析により、4 回の連続洪水流群による洪水中の河床変動は、洪水流のピーク時には著しく大きくなり、しかも洪水群による河床変動は 1 回の洪水で起こる洪水後の河床変動とは大きく異なるというこれまで知られていなかった貴重な情報を得ることができた。すなわち、第一の洪水中における河床変動は、通常の一過性洪水と同様にそれほど大きくなかったが、第二の洪水中には河床変動が進み、その後は洗掘箇所と堆積箇所のそれぞれの河床の変動が加速度的に大きくなること、横断構造物の存在によって、構造物周辺で砂州が大きく変形し、堤防への水あたりと構造物の周辺の流れが変化することによって深掘れが急激に進行することが示さ

れた。

このように洪水時の水面形の連続観測を用いた解析は、洪水中の河床高の変化を反映する重要な情報を提供し、堤防等河川構造物周辺の変状の早期発見と日常の維持管理に活用することができるので、特に大洪水が連続して発生することが危惧される状況では、河川管理上きわめて有効な方法であることが示された。

(2) 中小河川で何が起こったのか

東西に走る険しい四国山地が海岸線近くまで迫っている愛媛県、香川県の河川において、度重なる台風の襲来によって、大量の土砂が流出し河道に堆積した。特に人家の多い下流域、河口付近で河床が著しく上昇し、洪水氾濫の危険性が著しく高まった。このため緊急に大規模に河床掘削が行われ、安全の確保が図られた。

3. 洪水・土砂災害軽減に不可欠な維持管理

都道府県が管理する河川の整備は著しく遅れている⁵⁾。今後も整備が急速に進むとは考えにくい。これらの河川は、流域面積が小さく、降雨の集中度が高く、出水・土砂流出が急激に現れる。温暖化による豪雨頻度、強度の増大は、洪水の一層の激甚化をもたらすことになる。都道府県管理の河川においても国管理河川と同様に、温暖化による治水適応策を着実に進める必要がある。県など自治体が管理する河川にあっては、河川の縦・横断測量図や、洪水時の流量観測、水位観測など河川の計画に不可欠な基本的資料がないなど、きわめて憂うべき状況が多く見られる。

中小河川では、洪水・土砂災害軽減のため河川整備を着実に進めなければならないが、平成 16 年 8 月に実施された全国緊急点検および平成 20 年 6 月の河川維持管理実態調査の結果は、河川巡視、堤防点検等の維持管理を適切に実施し、堤防等の弱点箇所の早期発見、早期補修を行うことが、災害予防上極めて重要であることを定量的に示した。特に温暖化により、洪水の頻度が増大すると予想されている中で、弱点箇所の存在は致命的になる恐れがある。そのため、まず、それぞれの河川の状況に見合った維持管理計画をたて、これに基づいて災害軽減に努め、さらに、河川管理上必要なデータを収集し、洪水流下能力や洪水・土砂の流出特性把握に努めなければならない。

4. 河道計画の課題

河川は自然公物であり、自然現象が対象である河川の機能と役割を發揮させるためには、適切な河川管理が求められる。これまでの河川管理は施設管理を中心に行われてきたが、河川を治水・利水・環境の総合的

管理という河川法の目的に照らして、自然公物としての河川をどのように見て、管理していくのが望ましいのか、地球温暖化によって懸念される水災害を軽減し、適切に河川管理を実行するうえで、河道計画の課題をどのように解決していくべきかについて、技術的視点から述べる。

我が国の河川の中・下流部は、低水路と高水敷からなるいわゆる複断面形で作られている。洪水時と平常時の流量差の大きい我が国の河川では、洪水時の堤防近辺の流速を抑え、堤防の安全性を確保できること、平常時には低水路に安定して水を流下させることによって高水敷利用を可能にすること等から複断面形を標準的な河道断面として用いられてきた⁵⁾。しかし、近年の流域の土砂環境の変化などから、河道の状況に大きな変化が顕われてきている。それらは、河床低下により高水敷と低水路の比高差の増大、河道内樹木の繁茂や河床材料の変化のために河岸や堤防に沿って低水路内に深く、狭いみず道が形成され、また、川の生き物にとって望ましい流れ場、住みかが失われるなど治水上、環境上の問題の顕在化である⁶⁾。このため、複断面河道を、治水上、環境上も望ましく、かつ維持管理のしやすい断面形を検討し、段階的に変えていくことの可能性を検討することが重要な課題になりつつある。

河川の断面で、河幅、水面幅の持つ役割は、特に重要である。それは、洪水等の流れを規定し、また、川底の土砂の流れをも規定するからである。人々は、洪水時の川の流れを見る機会が少ないために、平常時の河川の大きな河幅とその中に見える小さな水面幅から、なぜ、河幅を広げる必要があるのか疑問を感じるとの声を聞くことがある。洪水災害を受けた河川では、現在の河川断面形、水面幅等を用いた解析結果から、技術者は、現在の河川計画の延長上で水位が計画高水位よりも高くなるので河幅を広げなければならないという説明をするが、非専門の人々には、理解が難しいと思う。河川技術者は、流域の状況や洪水流と河道の特性、その中で河川のあるべき姿から、河幅を広げることの必要性の説明を心がけなければならない。このためには、河川の河幅や水深は、力学的、地形学的にどのようにして決まっているのか、現在の河幅は、どのような決まり方をし、将来のあるべき河幅はどのようなものかについて分かりやすい説明をすることが望まれる。このためには、河川流域の特性、外力である洪水流や土砂流出などを考慮に入れ、河幅、水深等が決まる機構を明らかにすることが求められる。

河川の河幅、水面幅や水深等の河道断面に係る諸量が、力学的、地形学的にどのように決まってきたかについては、河川学、河川工学の本質的な課題にもかかわらず、河道の形成を力学的に、統一的に扱った研究

は著者の知る限り存在しない。国内、国外の河川技術研究では、河幅を一定幅として与えて、その中で洪水流や土砂移動などの水理現象を扱うことが一般的に行われている^{5),7)}。

灌漑水路や沖積河川の安定河道断面形状について、経験的に導かれたレジーム論が数多く発表されてきた⁸⁾。しかし、レジーム論で導かれた式は、力学的な考察が不十分で、長さの次元をもつ河幅等が設計流量 Q の 0.5 乗の次元で表される等、一般性をもたない経験式となっている。

池田ら⁹⁾は、河幅や水深を規定する式を水理的考察に基づき提案したが、広く変化する洪水流、河道条件で説明できる式とはなっていない。

山本¹⁰⁾は、我が国の沖積地河川における河道形成流量が平均年最大流量であるとして、低水路の幅、河積と流速について建設省(当時)の全国河川調査データ(全国河川粗度係数資料集)を用いて検討している。山本は、沖積地河川の平均年最大流量時の低水路の平均流速 V_m と摩擦速度 u_* の比、すなわち流速係数 ($\Phi = V_m/u_*$) が、河床材料の代表粒径と河床勾配の関数 $f_1(d_r, I)$ で表現され、また、洪水流の摩擦速度の 2 乗 (u_*^2) が代表粒径の関数 $f_2(d_r)$ で表現されるとして、これらの二つの関係を用いて、低水路の河幅 B ($= f_1^{-1} f_2^{-3/2} g Q_m I$)、平均水深 H_m ($= f_2/gI$)、平均流速 V_m ($= f_1 f_2^{-1/2}$) が、河床勾配 I 、河床材料の代表粒径 d_r 、平均年最大流量 Q_m の 3 量によって表現されるとした。しかし、河川スケールの検討で最も重要と考えられる関係式 $u_*^2 = f_2(d_r)$ の、 f_2 が次元を有する係数として扱われているために、 B 、 H_m 、 V_m のいずれの式も正しい次元で表されていない。このために、河川のスケールや洪水流のスケールの違いが結果に影響を与えることになり、式の適用範囲には限界がある。事実、日本の年平均最大流量時の河川データを用いて導かれた $u_*^2 = f_2(d_r)$ の関係式は、Bray ら^{11),12)}によるカナダのアルバータ州の河川では、成立し得ないことが山本によって示されている¹⁰⁾。この差は河川や洪水流のスケールの違いが直接的に影響していると考えらるべきであろう。山本の式は、河川スケールの決定機構に河川力学を組み込むことを試みてはいるが、導いた関係式が適切な次元で表現できていないことが弱点となっている。このことは、河道の規模や河床の安定の議論をするには、外力やその応答を無次元外力、無次元河幅等の形で議論されなければならないことを示している。また、低水路の河道形成流量が平均年最大流量のような比較的小さな外力規模を用いているが、今後の洪水流量の増大を考えると、河川管理との関係で低水路幅に対する河道形成流量ではなく、全河幅や全断面積を決める河道形成流量が検討対象とされなければならない。

河道で起こる水と土砂の輸送は、治水、利水、河川環境等多くの現象に関係し、河川の計画の基本を構成する¹³⁾。近年、洪水流については、流量や水位等、時空間的な観測が行われ、洪水流の実態はかなりの程度明らかになりつつある⁵⁾。一方、洪水流の観測に比べ土砂移動量の観測は困難なため、洪水時の土砂移動の実態はよく分かっていない。このため、土砂の移動量は流砂量式を用いて推定せざるを得ないのが実情である。しかし、現在の流砂量式は、河幅を考慮しておらず、河道中央での流砂量の評価を行っている。前述したように河幅はその中を流れる洪水流と流砂量を規定する最も重要な要素である。この問題に加えて、複雑な河道地形を有する河川において、現在の流砂量式の算定精度は著しく低いという課題を有する。このため、土砂移動に起因する河川災害の防止や河川環境の保全のための技術的対応が遅れており、土砂移動量の算定法については、これまでと異なる新しい視点での検討が求められている。一つの有力な方法は、後述する河川の河幅や断面形を決める機構の中で、土砂輸送量が決まるという考えに基づく算定法である。

これら洪水流と土砂輸送が関わる河道計画の技術課題を概観すると、改修途上にある多くの河川の河道整備、維持管理、さらには、地球温暖化に対応する治水と環境に配慮した適応技術の確立には、これまでの河道計画技術¹⁴⁾では不十分で、技術的、社会的に見て新しい技術展開が必要であることを示している。これらの課題について以下の章で検討する。

5. 流域スケールで見た多自然川づくり、河川管理－自然河川に学ぶ

我が国では、川づくりも河川管理も多自然を基本とすることを原則としている¹⁵⁾。平成18年10月の多自然川づくりレビュー委員会の提言によれば、「多自然川づくりとは、河川全体の自然の営みを視野に入れ、地域の暮らしや歴史・文化との調和にも配慮し、河川が本来有している生物の生息・生育・繁殖環境および多様な河川景観を保全創出するために、河川管理を行うことをいう」と定義している。この定義によれば、多自然川づくりでは、河川が本来有する自然性を考慮に入れ、治水と環境の調和する河川管理を目指している。しかし、現在の多自然川づくりは、洪水を意識したうえで治水と環境の調和した川づくりには成り得ていない。近年、河川の自然流況や洪水の流量変動が生態系に与える影響についての調査研究が国内外で行われるようになってきたが^{16), 17)}、流域スケールでの計画流量規模までも考えた自然性の高い河幅、断面形を有する川づくりまで入った議論がなされねば、真の多自然川づくりとは言えない。地球温暖化による気候変動が

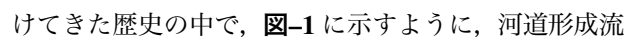
もたらす洪水流量の増大を考えると、自然環境の素晴らしさとともに、自然の脅威も理解しての多自然川づくりと河川管理を行っていくことが求められる。

治水と環境の調和した河道形成のためには、河幅、水深や断面形をどのようにすべきかを基本に考えることが必要である。そのような河道断面とは、自然河川の河道断面に近いものを考えている。自然が作る河川は、その特徴は平面形、縦・横断面形等に現れ、河幅、断面形の決まり方は、自然の力学法則に支配されていると考えられる。人間活動の影響を受けている現在の河川構造を自然河川の構造に照らして検討することは、治水と環境の調和した安定な河道断面の決定法等、多自然川づくりにとって重要である。このことはまた、大小さまざまなスケールからなる河道と洪水流に対して、普遍性の高い河道設計技術、管理技術を考えることにつながる。

以下では、流域スケールで見た多自然川づくりを念頭に、多自然川づくりの重要な要素である河幅、水面幅、水深、断面形が、流域における洪水流と河道特性量に対してどのような力学関係で決まっているかを国内・国外の自然河川から明らかにし、自然河川で得られた結果を将来河道や整備途上河川の川づくりと地球温暖化に対する河川の適応技術に生かす方策を議論する^{18), 19), 20)}。

6. 無次元河幅・無次元水深を規定する無次元河道形成流量

治水計画では、流域全体を見て基本高水流量が決定されており、それに対する河道の河幅や断面形は、計画高水流量が計画高水位以下で流れるように決めている。しかし、計画高水流量以下の他の流量に対しては、どのような水面幅や断面形が望ましいかについては十分考慮されていない。我が国の河川は、そのほとんどが整備途上の河川である。河道には樹木が生え、低水路のみず道が固定化されるなど河川管理上多くの問題を抱えている⁶⁾。河川管理は施設管理が中心になり、流域、河道全体を見た川らしい川を念頭に管理する考え方にはなり得ていない。流域の視点から豊かな自然性を有する河川の必要な河幅、水面幅、断面形を決める技術が確立できれば、整備途上段階の河川であっても、望ましい水面幅、断面形を有する川づくりが可能になると考える。

河川の河幅、水深等の断面形は、無数の大洪水を受けてきた歴史の中で、に示すように、河道形成流量（我が国では、現在の計画高水流量規模程度と考えている）、流域の地形、地質、河道勾配、河床材料（分布）といった外的因子の作用を受け形成されてきたものと考えられる。河道を作った河道形成流量以下の洪

水流に対して、河道は動的にほぼ安定した断面形、水面幅となっていると考えられる。ここで、動的安定河道とは、洪水外力によって変動が起こっても元の安定な状態に戻る河道を言う。一度、この安定な河道断面形が出来ると、**図-1**に示すように、河道断面形は、両矢印に示す関係、すなわち洪水流と河道の平面形・縦横断面形と流砂の相互作用の中で変動はするが安定状態が継続することになる。通常の河床変動は、この関係の中で起こっている現象である。

安定な河道断面に達する以前の河道は、河幅、水深、流量、勾配、河床材料の粒径は、相互に依存関係にあるため河道断面は変化するが、ひとたび河道形成流量によって安定状態に達すると、河幅、水深、流量、勾配、河床材料の間には、互いに独立な関係が成立するようになる。なお、地質や地形の河道形成への影響は、特別な地質の場合を除いては、河床材料と河床勾配で代表できると考えている。

河道の断面形状を河幅と水深で代表すると、安定な断面形は河道形成流量、河床勾配、河床材料特性等、以下の8つの独立な物理量で規定される。

$$f(Q, B, h, I, d_r, g, \rho, \sigma) = 0 \quad (1)$$

ここで、 Q : 流量、 B : 河幅、 h : 水深、 I : 河床勾配、 d_r : 代表粒径、 g : 重力加速度、 ρ : 水の密度、 σ : 河床材料の密度である。π定理より、次に示す無次元量関係が導かれる。

$$\phi\left(\frac{Q}{\sqrt{g}I d_r^3}, \frac{B}{d_r}, \frac{h}{d_r}, I, \frac{\sigma}{\rho}\right) = 0 \quad (2)$$

第1項は洪水の状況を表す無次元流量であり、第2項は無次元河幅、第3項は無次元水深である。本研究では、河床材料の代表粒径 d_r として、60%粒径 d_{60} を用いている。このように無次元表示することにより、河道のスケールや洪水の規模に関係なく、安定な河道断面を力学的に統一して説明できることを以下の章で

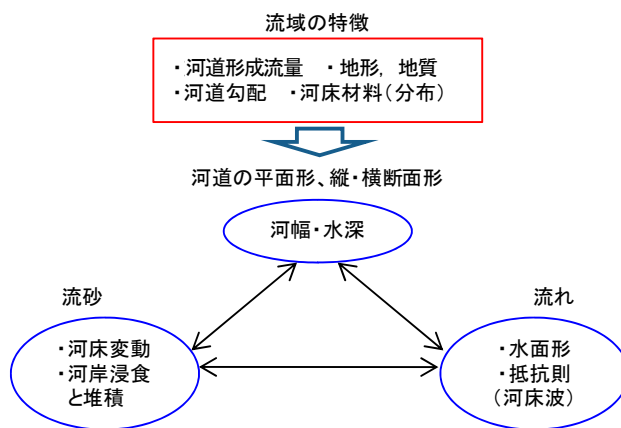


図-1 安定な河道形成の力学関係

示す。

7. 自然河川における無次元河幅、無次元水深と無次元河道形成流量の関係

最初に、式(2)に示す河道の無次元河幅、無次元水深と無次元河道形成流量の関係を、我が国とカナダの自然河川のデータおよび現地や実験室で行われた河道形成流量による河道拡幅実験の結果を用いて検討する。

我が国の自然河川として、明治時代の利根川の上・中流部の河道区間での洪水流データを用いる²¹⁾。**図-2**は、明治17年測量で得られた利根川上流河道の迅速図を示す。当時の利根川河道は、江戸時代の河道断面のまま、堤防は、あっても小さく不連続堤で、ほぼ自然河川のままであり、洪水時には河道から氾濫して流れていた。図中黒い鎖線が明治18年河道、橙色で引かれた線が明治44年の計画河道、青い実線が昭和24年の計画河道法線である。利根川では、明治18年、明治31年、明治43年、明治44年に大きな洪水が発生し、各時代に起こった洪水流の流量とその確率規模を**表-1**に示す。明治時代の利根川河道では、2~10年の確率流量が計画規模相当流量となっており、当時の常水路を形成する流量となっていた。**図-3**は、洪水発生年当時の利根川栗橋地点の河道横断面形である²¹⁾。明治時代の河床勾配、河床材料の代表粒径は、今日の利根川の同一地点の河床勾配、代表粒径と変わらないと考えられ、現在の河道の勾配、河床材料の代表粒径を用いる。

海外自然河川として、Brayら^{11), 12)}によるカナダアルバータ州の67個の河川データを用いて検討する。アルバータ州の河川は、常水路と氾濫原からなる自然河川であり、常水路満杯流量に相当する2年確率流量に

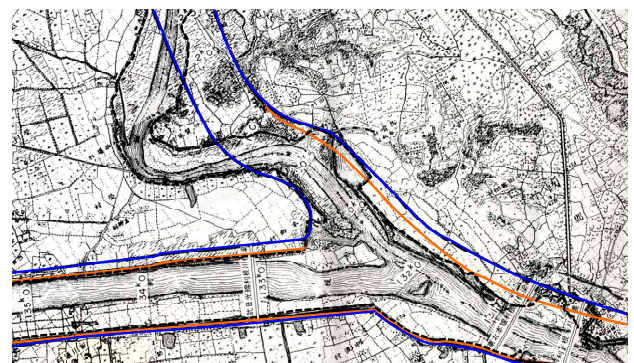


図-2 明治17年測量による利根川上流河道（迅速図）

表-1 明治時代の利根川における洪水の流量と確率規模

年代	流量 [m³/s]	基準点	確率規模
明治18年	3780	妻沼	2~3年
明治31年	3750	妻沼	2~3年
明治43年	6960	妻沼下流	—
明治44年	5570	八斗島	5~10年

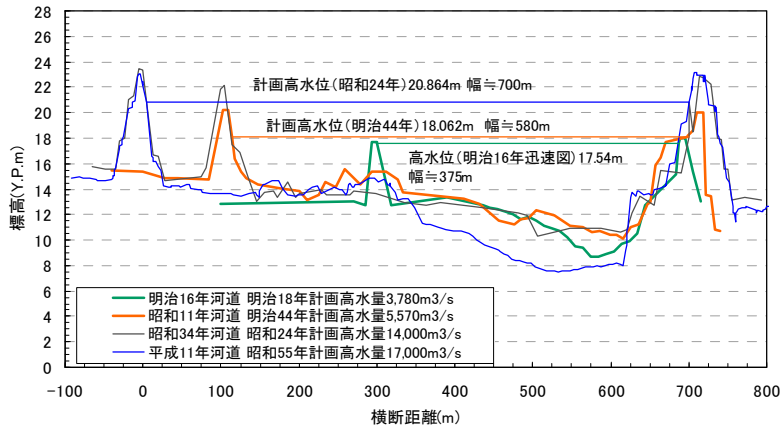


図-3 栗橋地点の洪水発生時の河道横断面図²¹⁾

表-2 無次元河道形成流量と無次元河幅，無次元水深の関係の検討に用いたデータ

	d [mm]	B [m]	h [m]	Q [m³/s]	$1/I$
明治時代の利根川 ²¹⁾	0.3~40.0	340~840	4.0~6.6	2 240~6 960	470~5 000
カナダ (アルバータ州) の河川 ^{11), 12)}	19.0~145.0	14~545	0.4~6.9	6~8 212	67~4 545
常願寺川大型複断面水路実験 ⁴³⁾	80~125	7.8~9.6	0.5~1.2	3.2~14.4	130
直線水路での拡幅実験-福岡・山坂 ²⁴⁾	0.67	0.34	0.02	0.002	400
直線水路での拡幅実験-平野 ²³⁾	0.83	0.84	0.02	0.0048	60

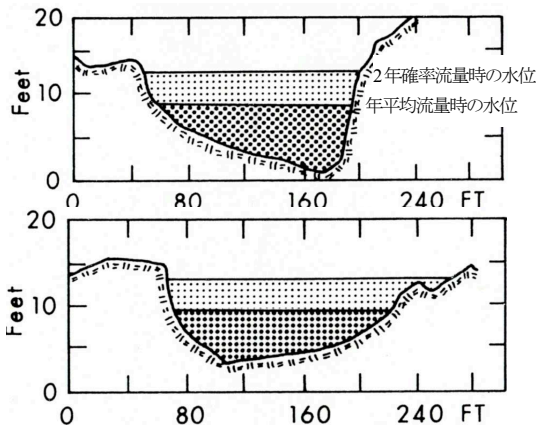


図-4 カナダの自然河川に見られる船底形断面面形¹²⁾



写真-1 アルバータ州の自然河川 (Peace River)²²⁾

より低水路河道が形成されていると言われている¹¹⁾。本研究においても、同様に2年確率流量を用いて検討する。データの詳細については文献^{11), 12)}を参照されたい。図-4に示すカナダの自然河川の低水路横断面面形は、船底形断面面形であることが分かる。図中の高い水位は、2年確率流量時の水位を、低い水位は、年平均流量時の水位を示している。用いるデータの一覧を表-2に示す。写真-1は、アルバータ州の典型的な自然河川であるピース川の状況を示す²²⁾。表-2には利根川とカナダの自然河川データの他に、著者ら⁴³⁾による常願寺川河川敷に作られた石礫材料からなる直線区間と蛇行区間を有する大型複断面水路(水路長190m, 全河幅8m, 低水路幅3m, 水面勾配1/130, 代表河床材料粒径8cm)実験, および平野²³⁾, 福岡・山坂²⁴⁾による直線水路での拡幅実験の3種類の実験データを示す。

明治時代の利根川, カナダの自然河川, および, 現地と実験水路での拡幅実験における無次元河幅, 無次元水深に対する無次元河道形成流量の関係をプロットした結果を図-5に示す。図-5より, 縦軸の無次元河幅, 無次元水深がそれぞれ, $10^2 \sim 10^6$ と $10^0 \sim 10^4$, 横軸の無次元流量が $10^3 \sim 10^{14}$ と広く変化する無次元数の範囲において, 河道形成流量, 河床勾配, 河床材料の代表粒径の組み合わせからなる無次元河道形成流量により決まり, それらは, 図中の直線で近似した式(3), 式(4)で表現できることが分かる。

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} I d_r^5} \right)^{0.40} \quad (3)$$

$$\frac{h}{d_r} = 0.13 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} I d_r^5} \right)^{0.38} \quad (4)$$

以下では, 式(3), 式(4)を「福岡の式」と呼ぶ。ここで独立変数 I は, 無次元河道形成流量 $Q/\sqrt{g} I d_r^5$ の中

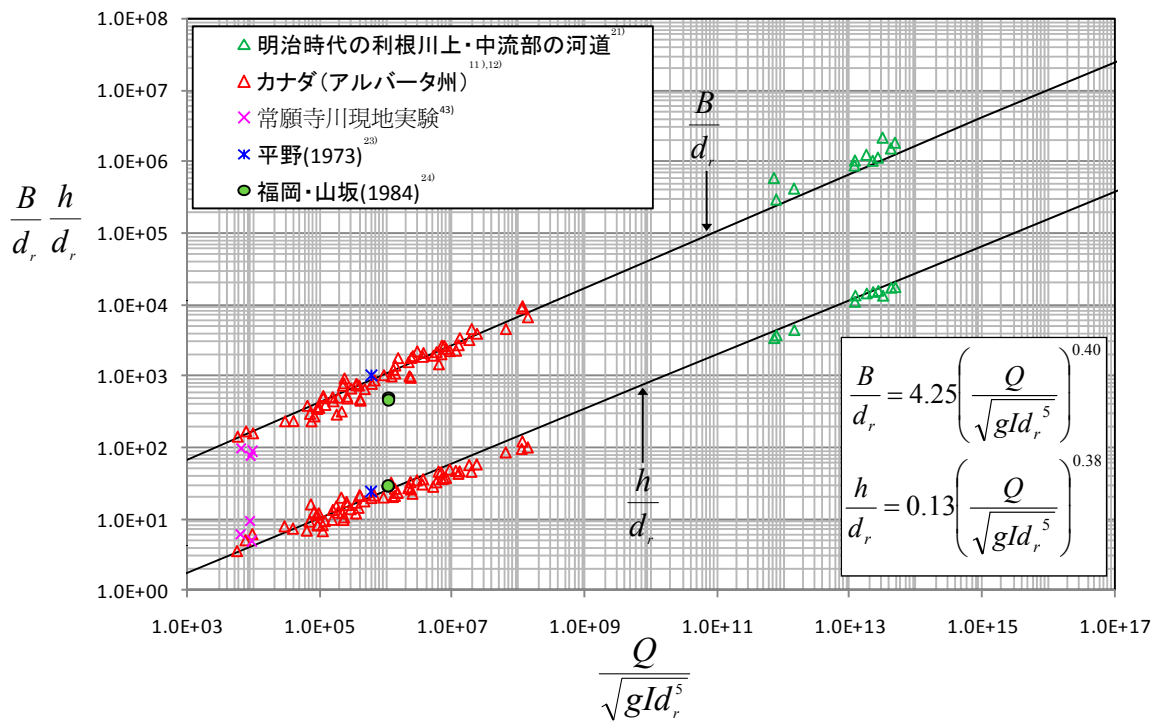


図-5 無次元河道形成流量と無次元河幅，無次元水深の関係

で g との結合 gl で考慮されている。また、水と土砂の比重 σ/ρ については一定値として扱う。利根川やアルバータ州の自然河川データと実験室データを同一図上で比較できる理由は、無次元河幅、無次元水深と無次元河道形成流量という無次元諸量を用いて表現しているためである。

安定した河道の無次元河幅、無次元水深は、河道形成流量、河床勾配、代表粒径で表現される無次元流量、 $Q/\sqrt{gld_r^5}$ が支配的な量であることを示す。

8. 一級河川基準地点の無次元河幅，無次元水深と無次元河道形成流量の関係

(1) 一級河川基準地点における計画断面諸量

次に、自然河川で成立した無次元河幅、無次元水深と無次元流量の関係が我が国の一級河川の基準地点を通過する洪水についても成立する関係であるかを検討する。基準地点は河川における高水計画や低水計画を検討する際の重要な地点であることから、一級河川の基準地点では、洪水流の水位、流量や河道断面形、河床材料粒径分布等の観測値が長期間にわたって集められている。河床材料粒径は、各河川の河床材料調査により得られた粒度分布より評価する。河道の安定に影響を及ぼす粒径集団は河川ごとに異なるが、ここでは、混合粒径河道で一般に用いられている重量で60%通過粒径 d_{60} を代表粒径として用いる。河床勾配は、基準地点付近の平均的な河床勾配を用いる。河口のように、ほぼ水平な河床の区間では、河床勾配に変えて、水面

勾配を用いる。

河川整備基本方針河道は、計画高水流量を計画高水位以下で流下できるように計画されている。本研究では109水系の一級河川において、計画高水流量が基準地点を流下するときのデータを用いて²⁵⁾、式(3)、式(4)の関係を調べる。河積、水面幅、水深は、河川整備基本方針で想定している河道（以下で基本方針河道と呼ぶ）に、計画高水流量が流れたときの計画高水位の縦断形から求めている。計画高水流量は、各河川の治水安全度(1/200, 1/150, 1/100)に対応して決まっている値を用いる。また、複断面形を有する河道の水深は、平均水深を用いている¹⁸⁾。

(2) 基本方針河道における無次元量間の関係

無次元河幅、無次元水深に対する無次元流量の関係を図-6に示す。この図より、自然河川と同様に基準地点の無次元河幅と無次元水深は共に、計画高水流量、河床勾配、河床材料の代表粒径より成る無次元計画高水流量より決まることが分かる。しかし、利根川やアルバータ州の自然河道に比べて基本方針河道では、ばらつきが若干大きい。これは、我が国の一級河川の基準地点は、河口の感潮区間や低平地、山地河川といった、様々な地形条件の場に定められているのに対し、アルバータ州の自然河川は礫床河川を対象としているためであり、さらに、無次元河幅、無次元水深の決定に、単断面、複断面の横断形状が考慮されていないことも関係している。図中の無次元河幅の近似曲線より上側には複断面河道が、下側には単断面河道が多く分布して

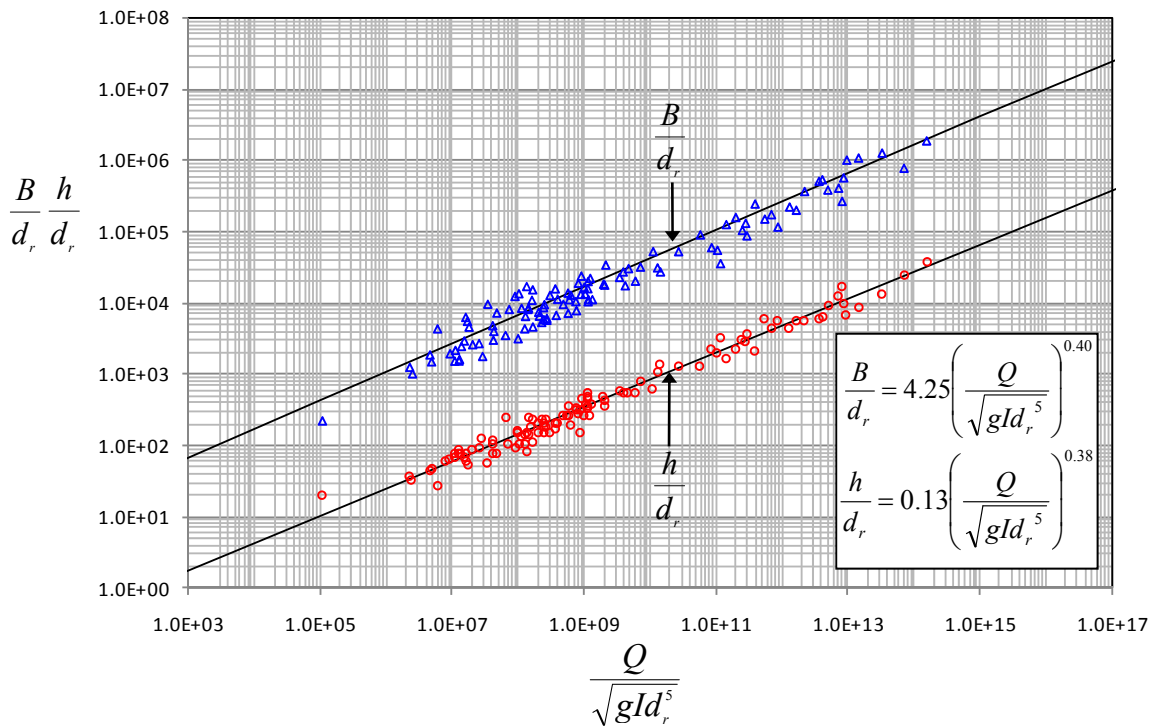


図-6 基本方針河道における無次元流量と無次元河幅，無次元水深の関係

おり，逆に，無次元水深の近似曲線の下側には複断面河道が，上側には単断面河道が多く分布している¹⁸⁾。

福岡の式が，国内，国外の自然河川，我が国の基本方針河道を含め種々のスケールの洪水および河道に対して同様に成立することは，大変重要な意味を持つ。これには，以下に示す幾つかの理由が考えられる。世界の川はいろいろな河道形状，河床形態をしており，河幅等を規定する力学的法則性が存在するようには見えない。しかし，洪水によって作られた沖積地河川の安定断面形は，図-1に示したように，長い歴史の中で，河川流域スケールと関係する大流量，河床勾配，河床材料の粒径の条件の下で形成されたもので，それらは，大きな河幅，大きな水深を有する河道と考えるのが自然である。したがって，相対的に水深が低い洪水時に見られる砂州等に起因する流れの蛇行がもたらす河床や河岸の洗掘・堆積量は，自然が決めた河幅や断面積に比べるとわずかな変化量であり，これは安定な河幅の中での変動とみなすべきものである。アルバータ州の自然河道では，2年確率流量より大きな洪水流量も発生しているが，bankfull dischargeに相当する2年確率流量で安定した常水路河道が形成されている。一方，我が国の109水系の基本方針河道では，図-7に示すように，これまで，そのうちの，80%の基準地点で計画高水流量の大きさの80%を超える既往最大流量が発生している²⁵⁾。すなわち，我が国の直轄河川の基準地点では，すでに，計画高水流量規模の大洪水が生じ，それに対応した洪水・土砂移動により安定した河道が形成されていると考えてよい。このことは，明治以来，度

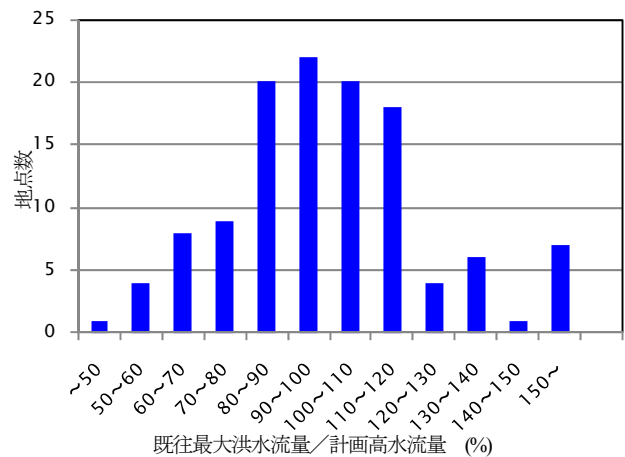


図-7 既往最大洪水流量と計画高水流量の比率²⁵⁾

重なる甚大な河川災害を経験することにより，技術者が自然への畏怖の念を持ちながらも洪水外力の大きさを認識し，自然から学びながら，引堤等河幅の拡幅や堤防の建設等を行い，再度災害の防止に努めてきたこと，その結果，基準点付近では計画高水流量規模の流量を流下させる河道がほぼ出来つつあり，その河道に対して河岸を護岸し，治水安全度を高めてきたこと，別の言い方をすると，今日の河道は，改修にあたって自然の猛威を常に意識して，自然から学び，自然に馴致するように河道を作ってきた結果と見るができる。巨大な堤防や堅い護岸を有し，一見，人工的に見える基本方針河道にあっても，その無次元計画高水流量に対する無次元河幅，無次元水深が，自然河道の無次元河道形成流量に対する無次元河幅，無次元水深と

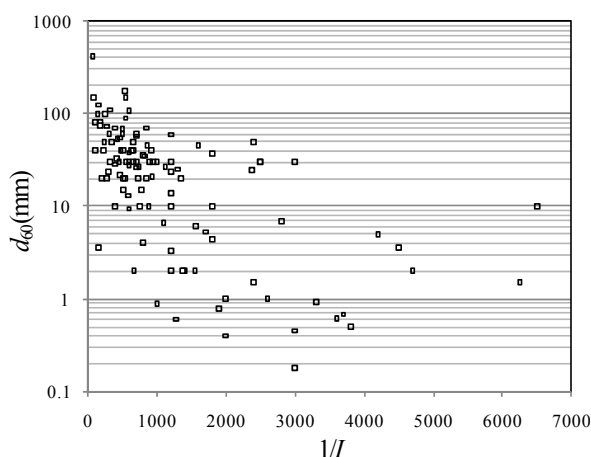


図-8 全国 109 水系基準地点における d_{60} 粒径と河床勾配の関係²⁵⁾

同じ関係で説明できることは、基本方針河道も、動的に安定な自然河道のそれに類似していると言うことができる。

なお、図-6 にプロットされたデータには、富士川、天竜川、黒部川、吉野川、球磨川等、基準地点の河岸や河床が岩で構成されていたり、河底に岩が露出しているいわゆる岩河道は含まれていない。また、河岸、河床が粘土主体の粘性土河川²⁶⁾は、沖積地河川とその形成機構が異なることから、式(3)、式(4)を導いたデータから除外されていることに注意を要する。

福岡の式は、自然界における大きな洪水流によって形成された河道における、互いに独立な物理量、流量 Q 、河幅 B 、水深 h 、河床勾配 I 、河床代表粒径 d_r を用い、無次元河幅、無次元水深、無次元流量で表現した力学関係式である。式の持っている意味を理解して用いることが重要であり、無次元形のままで用いなければならない。この理由を以下に示す。

式(3)は、式(5)のように河幅 B で書くことは可能である。

$$B = 4.25 \left(\frac{Q^2}{gI} \right)^{0.2} \quad (5)$$

しかし、式(5)の表現は一般性を持たないことに留意すべきである。すなわち、式(3)の両辺に含まれている河床材料の粒径 d_r は、0.4 乗という式のべき乗のために両辺の d_r は消し合って式(5)には含まれず、粒径は河幅に効かない式形になっている。しかし、2つの理由からこの解釈は正しくないと考えている。第一は、動的に安定な河道の河幅の決定には、河床材料の代表粒径 d_r は欠かせないことによる。図-8 は、式(3)、式(4)を導くために用いたデータ²⁵⁾のうちの互いに独立な代表粒径 d_r と河床勾配 I をプロットした関係を示す。図より、同一勾配でも、異なる代表粒径を持つ河川が多いのは、それぞれの河川で安定河道断面の大きさとそれを決める流量が異なるためであり、式(3)、式(4)

が、沖積地河川の河道力学の基本式を与える。式(3)、式(4)では、河床勾配 I は、外力である重力 g と一体となって河道形成に関係するとし、無次元流量の中では、 gI の形で陽的に考慮されている。また、陰的には図-8 に示すように河床材料の代表粒径は I との関係で考慮されている。第二は、式(3)、式(4)の表現で重要なことは、無次元河幅、無次元水深が力学的にどのような無次元関数関係によって決まるのかであって、式(3)、式(4)は、データを平均的に説明する近似式である。したがって、式のべき乗(0.40, 0.38)については、さらに個々の河川の特性を踏まえて、データを調べてみる必要がある。以上のことから、無次元河幅、無次元水深の算定は、式(3)、式(4)の無次元形を用いて求めなければならない。

9. 治水と河川環境に望ましい河道断面形—船底形断面形

我が国河川の中・下流部で一般的な複断面河道は、河川を生活の場とする生物にとっては空間的連続性が低く、必ずしも好ましい状況とはなりえていない。近年、高水敷と低水路の比高差が大きくなり、治水上、環境上望ましくない状況が顕れてきている。さらには、気候の温暖化は、洪水流量の増大をもたらすと言われており、流量増の一部を河道で対応しなければならない事態が起こることも予想される。そのため、治水、環境の両面にとって望ましい河道の断面形状を検討する必要がある。

カナダやアメリカの自然性の高い河道の多くは図-4 に見られるように船底形横断面形をしており、水面幅や水深は式(3)、式(4)を満足している。船底形断面形とは、河道断面の潤辺の形が船の底の形に近い断面形のことを言い、直線河道や蛇行河川の変曲点付近の断面を除いてはその上下流の河道平面形と流れの影響を受け、左右どちらかに最大水深部分を持つものが多い。ここで言う船底形断面とは、流量の増大(減少)とともに水面幅が増大(減少)するような潤辺が連続的に変化する河道断面形で、水面幅と水位の関係が河道を特徴付けている。

我が国の基本方針河道において、ほぼ完成河道区間にある基準地点の横断面形もまた、川が有する自然の営力によって船底形形状をなしているものが多い。一例として、斐伊川基準地点の河道横断面図を図-9 に示す。図-10 は、船底形断面形を有するミシシッピー川の断面形^{28), 29)}である。これを無次元形で表し、斐伊川の断面と比較したものを図-11 に示す。両者の無次元断面形は細部の形が異なっているところも見られるが、一見、堤防によって河岸が立っているように見える我が

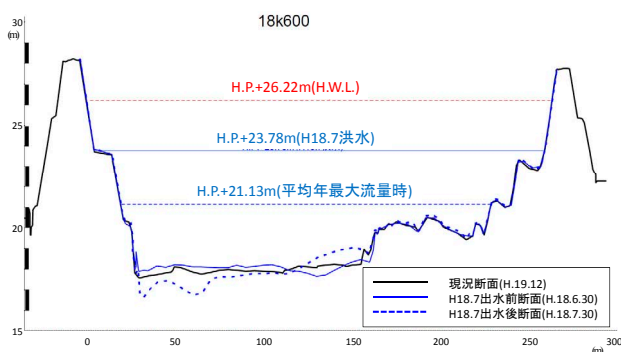


図-9 洪水流に対して安定な断面形を有する斐伊川基本方針河道 (基準地点 上島)

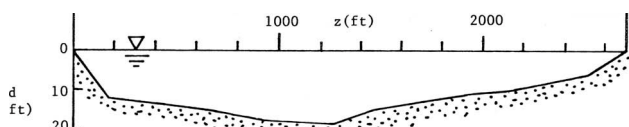


図-10 ミシシッピー川の船底形断面形²⁸⁾

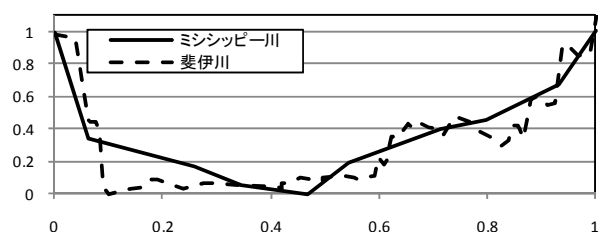


図-11 ミシシッピー川と斐伊川の無次元断面形の比較

国の多くの直轄河川においても、明確な複断面形、および単断面形の河川を除いては、近似的に船底形断面形をなしていると言える。

今後、整備途上河川を段階的に治水と環境の調和した多自然河川に改修していくときには、船底形断面形を標準形とするのが望ましい。船底形断面河道には自然の営力が作用し、自然に適合した断面形をとることになる。図-12には、複断面河道から船底形断面河道への段階的改修の一例を模式的に示す。上下流の平面形によっては、主流部が中心から右や左に移動することになる。段階的改修においては、人間が河川に手を貸すことによって、河川自らが自律的な河道を作りあげていくという考え方が基本になければならない。船底形横断形状が、規模の異なる洪水流に対しても、概ね安定形状を保ちうるかは重要な検討課題である。図-9に示す基本方針河道である斐伊川基準地点河道区間の例では、これまで洪水を度々経験している基準地点における河道について、洪水前後の横断測量結果の重ね合わせから、河床変動は認められるが、現況断面では、洪水前の河床に戻っている。さらに、基準地点を含む1.2km区間では河道はほぼ動的に安定していることが明らかになっている。一方で、船底形横断形状は水流と河床面との境界、すなわち潤辺形状を連続的にすることにより、河床面は水位に応じた冠水頻度をとること

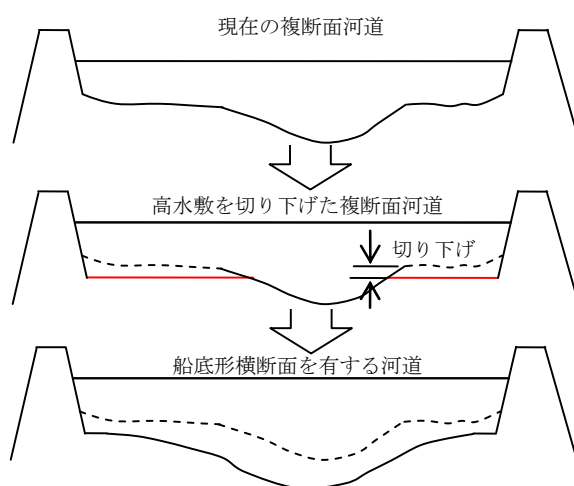


図-12 複断面河道から船底形断面河道への段階的改修の一例

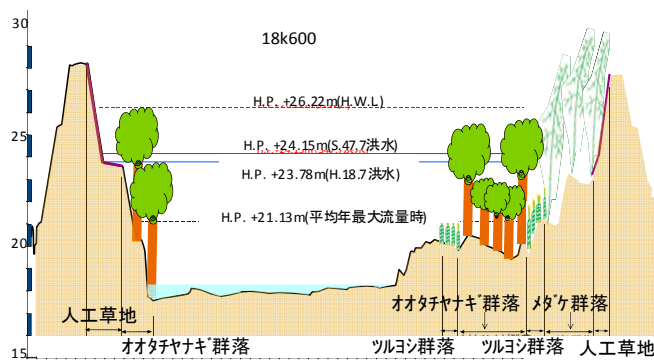


図-13 斐伊川基準地点 (上島) の植生状況

とになる。これによって河道内の浸水深、浸水頻度に応じた種類の樹木が生育し、河道内における樹木繁茂範囲の拡大を防ぐことができる。さらに、陸域と水域を連続的に移動する生物にとっても好ましい水域環境を有する縦横断面形を提供する。河道内樹木の種類やその維持管理の適正化については、図-13の斐伊川基準地点のように、すでに基本方針河道が出来上がっている区間について、過去に発生した洪水流水位と木本、草本の種類、繁茂状況の関係を河川水辺の国勢調査データや、現地での調査によって関係づけ、また専門家の意見を聞きながら、計画高水流量規模まで含めた多自然川づくり、河川管理が適切に行えるよう水辺の環境情報を積み上げ、望ましい水辺を形成していくことが望まれる。

10. 現況河道の河道管理に対する福岡の式の適用

前章まで流域規模から決まる計画高水流量相当の流量を河道形成流量として、無次元河幅、無次元水深が無次元河道形成流量によって決まることを示した(図-5, 図-6)。このことは、我が国の直轄河川の安定な河道を

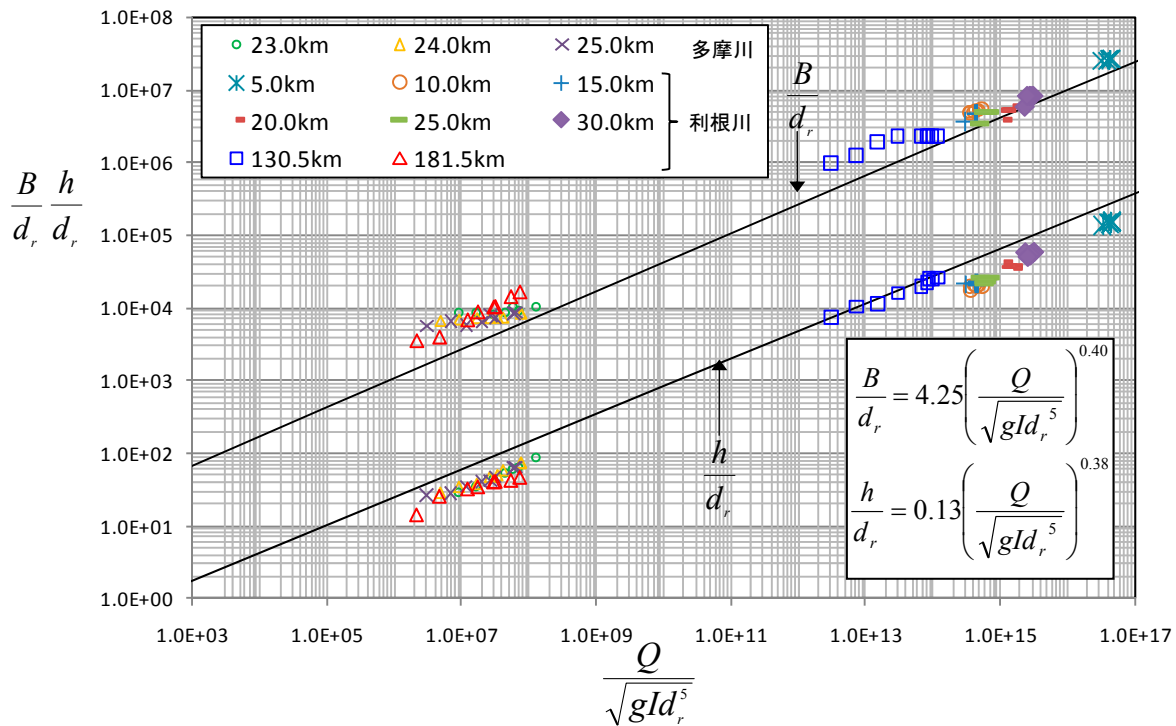


図-14 現況断面における実績洪水時の無次元量の関係

形成する流量（河道形成流量）は、平均年最大流量^{13), 15)}よりも大きい流量，すなわち計画高水流量に相当する流量であることが明らかになった。このように形成された安定な河幅，断面形等を有する河道に対して，計画高水流量以下の洪水流量が頻繁に発生する。この場合にも，十分な流量と土砂移動があるため，河床や河岸は洗掘，堆積を受け変化する。しかし，これは，河道形成流量以下で生じている水理現象であるため，動的安定の中での河床，河岸変化である。一方，地球温暖化によって現在の計画高水流量規模を超えた流量が生じると，その流量が新たな河道形成流量となり，新たな無次元河道形成流量に応じた無次元河幅，断面形の河道が形成されることを福岡の式は示している。

図-14は，多摩川，利根川の現況河道断面で，実際に起こった洪水流の主要地点での実測水位－流量ハイドログラフに対応する水面幅，水深を用いて，無次元流量に対する，無次元水面幅，無次元水深の関係を示したものである。ここでは，無次元計画高水流量（無次元河道形成流量）よりも十分低い流量が対象であるために，「無次元河幅」の代わりに「無次元水面幅」が検討対象となる。連続堤防の存在が一般的である我が国の河川では，流量が増大してくると，水面幅は河幅と一致するようになる。

多摩川洪水は，平成19年洪水（基準地点石原，最大流量4088 m³/s），利根川洪水は，前記平成10年（基準地点八斗島，9200 m³/s），平成19年（銚子大橋5499 m³/s）の大洪水である。図中の実線は，福岡の式を示す。各河川で，代表粒径は，河道形成流量条件で用いた粒径

を用い，河床勾配には実測水面勾配を用いている。図は，無次元水面幅，無次元水深のいずれも，低い無次元流量時の値から徐々に無次元河道形成流量時の値に近づいていく様子を示す。検討対象河川は，堤防間の幅は十分大きい大河川であるために，発生洪水の無次元水面幅は，福岡の式より上側にプロットされている。中小洪水流量時には，広い河道断面形状のために水面幅が広がり，大きめの無次元水面幅，それゆえに小さめの無次元水深をとるが，大流量時には，無次元水面幅は，ほぼ河道形成流量時の値に近づく。河幅が無次元河道形成流量で決まる無次元河幅よりも狭い河道整備段階の河川では，無次元水面幅は，福岡の式よりも下側にプロットされることになる。

図-15は，アメリカ地質調査所（USGS）によるサクラメント川の29個の洪水流観測データ²⁷⁾，Nakatoによるミシシッピー川の53個の洪水流観測データ^{28), 29)}について，同様に検討したものである。用いたデータの一覧を表-3に示す。いずれの洪水流量も，計画規模流量よりも小さいものであった。データの詳細については文献^{27), 28), 29)}を参照されたい。

Nakatoにより用いられているサクラメント川の29個のデータは，流量範囲142～2243 m³/sである。1960～1978年の19年間の観測では，bankfull discharge (2270 m³/s)は12回起こっており，年最大流量は，ほぼbankfull dischargeと考えられる。写真-2は，サクラメント川の状況を示す³⁰⁾。ミシシッピー川の河幅は十分広いために，通常の洪水に対しては，水面は広がりやすく，無次元水面幅は，福岡の式よりも大きくなっている。一

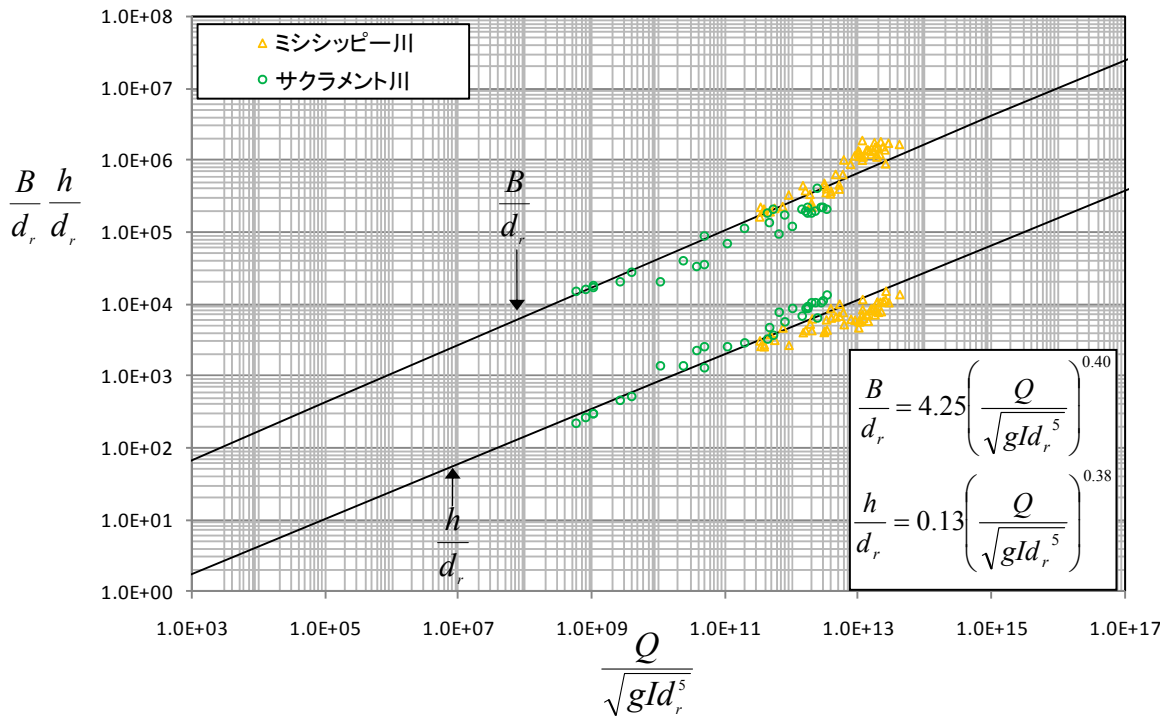


図-15 サクラメント川，ミシシッピー川の無次元量の関係

表-3 サクラメント川，ミシシッピー川のデータ

	d [mm]	B [m]	h [m]	Q [m ³ /s]	$1/I$
サクラメント川 ²⁷⁾	0.4~9.9	80~160	2.0~8.2	142~2243	3472~10101
ミシシッピー川 ^{28), 29)}	0.25~0.85	86~880	1.4~7.0	46~4500	1400~550000



写真-2 サクラメント川 (Colusa)³⁰⁾

方，サクラメント川は，水面幅は小さめに出ており，計画規模の流量に対しては，河幅を広げるなど河道断面を大きくすることが必要と思われる。

次に，整備途上段階の河川において，河川管理の共通した3つの課題の改善のための河幅，断面形の決め方について，福岡の式の適用方法を述べる。

(1) 樹木の密生により流下能力が低下している河川の樹木伐採範囲および伐採後の河道断面の決め方

- a) 伐採区間の河床材料粒度分布，60%粒径および河床勾配を求める。
- b) 検討対象流量と樹木伐採区間の伐採範囲とそれを考

慮した河道断面形を，福岡の式により現地の河床材料粒径，河床勾配等を用い検討する。断面形は船底形断面とする。樹木伐採区域を設定し，設定流量を河床が安定するまで通水し河床変動計算より断面形と河床材料を求める。

- c) 設定条件では，河床低下が大きすぎる場合は，河積を広げる。堆積が多い場合は，河積を縮小する。a)~c)の手順を繰り返す。
- d) 対象区間の最終断面について，設定流量に対し福岡の式が成立するかを，その区間の安定河道断面，河床材料，河床勾配を用いて確認する。

(2) 土丹露出^{31), 32)} やみず道の深掘れ，固定化^{33), 34)} 等が現れている区間の河床上に砂礫を堆積させ，河床高を回復するための断面形，水面幅の決め方

- a) 一般に，露頭した土丹上には，洪水時，砂礫が存在できない。砂礫供給源である土丹露出河床の上流の河床材料粒度分布を調べ，事前にある程度の厚さの砂礫を敷き均しておく。検討区間の河床勾配を求める。
- b) 河床高を回復する区間の河道断面形を，検討対象流量と想定河床材料粒径，河床勾配を用いて福岡の式を用いて一次設定する。断面形は船底形とする。
- c) 事前に置いた河床材料および上流から供給される河

床材料について、与えられた流量、勾配、河道断面形で河床高が動的に安定するかを河床変動計算によって調べる。

- d) 河床が安定せず河床低下が大きい場合には、船底形断面を広げ、堆積が大きい場合には、断面形を縮小し、a)～d)の手順で検討を行う。
- e) 河床が動的に安定することが明らかとなった場合には、無次元水面幅、無次元流量の関係式を満足する範囲におさまるかを検証し、船底形断面の二次設定をする。
- f) 有効な河床材料が河床に留まることが不可能な場合には、土丹河床上に巨石をある分布で配置するか、簡易な床止めを設置するなどの措置を行い、砂礫が留まるようにして、同様な検討を行い船底形断面形を決める。

(3) 中小河川における多自然川づくりの河幅、水面幅、水深等の検討方法

中小河川では、河道の流下能力を高めるための河道拡幅に必要な土地の制約が大きい。現行の多自然川づくりには、河川工学の視点からの議論が不十分で、河幅を決める指標がないため具体的設計論になり得ていない¹⁵⁾。

- a) 対象としている中小河川は、どのような治水、環境上の能力、位置づけにあるかを明確にするために、福岡の式において流量、河幅、勾配、河床材料の代表粒径の関係から河幅、水深等を検討する。
- b) 福岡の式より、治水と環境の両面から決まる自然河道に近い河幅（水面幅）、水深はどの程度必要なのか、多自然川づくり、河川管理の観点から、対象とする流量に対し、河川周辺の土地の利用状況を勘案し、治水上、環境上から現在の河幅、水深等は、どの程度まで改善可能なかを明らかにする等、方策を検討する。

以上のように、福岡の式は、流下能力が不足している河道において、低水路内の滞筋幅、低水路幅、全河幅のような河幅の変更とそれに対応する河道の断面形の決め方に対し判断材料を与える。さらには、維持管理、予防的な治水対策、治水システム、河川環境の回復等、治水計画の喫緊の課題、河川事業における改修の必要性和改修の効率化、事業の優先順位などの検討にも用いることが可能であると考えている。今後、これら項目に対し、具体的な適用例から検討方法を見出していくことになる。

11. 無次元掃流砂量の算定と健全な土砂輸送を生じる河道断面の創出

沖積地河川の土砂移動量は、河道災害、河川環境に

密接に関係する重要な物理量であるが、洪水時に容易に観測可能な流砂量測定器が少ないこと、また、河床の複雑な挙動による流砂量測定の困難なことから観測例は多くなく、また流砂量の観測値からだけでは、河道断面と流砂運動の関係がよく分からないのが実態である^{5), 6), 7)}。流砂運動は、河床面に作用する流れのせん断力によって起こることから、流れと流砂運動をモデル化し、河床面に作用する流れのせん断力と関係づけ、流砂量式が求められている。しかし、河川の土砂輸送問題に使われている流砂量算定式は、その算定精度に問題があり、河川に適用可能な精度の高い実用的な流砂量算定法が求められている⁵⁾。これまでの流砂量式は、河幅等河道の器の大きさについての考慮はなく、広い河道における中央部での流砂運動を想定して導かれている。しかし、洪水流や土砂の流れは、**図-1**に示すように、河道断面のスケールを決める流域における支配的な物理量によって規定された安定な河道断面内で起こっており、そこでの流れによって決まる流砂量は、河道の断面形、水面幅を考慮せずに決まる量ではないと考える。

本章では、河道における掃流砂量は、安定な河道断面形の中で決まる力学現象であるとして、前章まで明らかになった河幅等、安定な河道断面を決める機構をも考慮しこれまでとは異なる考えに基づく流砂量算定法および流砂量式を示す^{35), 36)}。河川における洪水流量は、通常、河道形成流量よりも十分小さい流量であり、そこでの流砂運動は、安定な河道断面の中で起こっている水理現象である。河川の掃流砂量は、河道断面形が決まっていることによって定まる量である。このことが、式(1)において、河幅、水深、河道断面形を決めるための独立な物理量の中に掃流砂量が含まれなかった理由である。もちろん、流域からの生産土砂が多く、掃流土砂が多量に河道に出て来て、安定な河道断面形が出来るまでの変化の過程においては、掃流砂量が密接に関係するが、一度、安定な河道が出来上がると、掃流砂量は、河道断面形およびそれを決める諸量の従属変数になる。

上述のことから、掃流砂量は、安定な河道断面を形成している互いに独立な物理量間の力学関係によって規定されており、河道断面形を決めた互いに独立な物理量、すなわち、式(1)の物理量間の関係から決まるとすると、式(6)の関係を導くことができる。

$$Q_B = f_1(Q, B, h, I, d_r, g, \rho, \sigma) \quad (6)$$

ここで、 Q_B ：掃流砂量である。式(2)を導いたと同様の次元解析を式(6)に適用すると、式(7)に示す無次元量間の関係が導かれる。

表-4 ミシシッピ川のスリットデータ^{28), 29)}

河川	d [mm]	B [m]	h [m]	Q [m ³ /s]	$1/I$	Q_B [m ³ /s]
ミシシッピ川	0.25~0.85	86~880	1.4~7.0	46~4500	1400~5500000	$4.37 \times 10^{-7} \sim 2.15 \times 10^{-2}$

表-5 USGS スリットデータ³⁷⁾

河川	d_m [mm]	B [m]	h [m]	Q [m ³ /s]	$1/I$	Q_B [m ³ /s]
Tanana River at Fairbanks	40	107~469	1.4 ~ 2.9	345~2020	1900~2400	$2.3 \times 10^{-4} \sim 3.4 \times 10^{-2}$
Wisconsin River at Muscoda	0.5	219~310	0.7 ~ 3.4	87~1240	1900~4500	$4.0 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-2}$
Black River near Galesville	0.6	72~122	0.55~1.9	13~256	2800~9000	$7.1 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-3}$
Chippewa River near Caryville	8.0	124~247	0.89~2.8	31~779	4000~11000	$2.0 \times 10^{-5} \sim 5.1 \times 10^{-3}$
Chippewa River at Durand	0.8	153~244	0.61~3.2	51~884	2800~4300	$2.2 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-2}$
Chippewa River near Pepin	0.5	171~277	0.75~1.8	70~399	1700~5900	$6.4 \times 10^{-4} \sim 5.5 \times 10^{-3}$

表-6 スリット実験データ

(a) 土木研究所水路実験^{38), 39)}

(b) 寒地土木研究所水路実験⁴⁰⁾

データ数	d_m [mm]	h [cm]	Q [l/s]	$1/I$	Q_B [cm ³ /s]
36	1.038	19.3~43.7	43~200	613~4545	0.10~25.25
64	2.21	11.4~51.5	28~350	63~1538	0.01~66.94
63	2.62	19.6~51.3	90~325	340~1667	0.21~54.31
52	3.76	18.1~51.8	80~400	352~1111	0.22~57.66
31	4.58	19.4~42.3	80~350	431~800	0.39~18.97
21	10.0	21.0~50.5	395~1443	172~245	0.80~192.80
14	18.1	23.1~50.2	540~1630	133~183	1.53~270.31

	d_m [mm]	h [cm]	Q [l/s]	$1/I$	Q_B [cm ³ /s]
実験1	28	57.1	1000	214	165.49
実験2	27.6	55.3	1000	214	386.21
実験3	22	59.3	1000	214	230.52
実験4	23.3	56.8	1000	214	183.60
実験5	28.4	59.2	1000	214	325.10
実験6	24.6	58.6	1000	214	83.87
実験7	11.3	65.2	1500	214	610.31
実験8	30.3	64.2	1500	214	616.21

※粒径 18.1 [mm] は混合粒径

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sg}Id_r^5} = \phi_1 \left(\frac{Q}{\sqrt{g}Id_r^5}, \frac{B}{d_r}, \frac{h}{d_r}, I, \frac{\sigma}{\rho} \right) \quad (7)$$

ここで、 s は砂礫の水中比重で、 $s = (\sigma - \rho) / \rho$ で表される。式(7)では、河岸侵食、上流域の土砂崩壊等の影響を強く受ける浮遊砂量は考慮せず、掃流砂量のみを対象としている。式(7)右辺の第2項、第3項は、それぞれ式(3)、式(4)の関係より右辺第1項の無次元流量で表現できることから、式(7)は、式(8)の形で書くことができる。

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sg}Id_r^5} = \phi_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{g}Id_r^5}, I \right) \quad (8)$$

式(8)の検討に用いた掃流砂データを、表-4、表-5、表-6に示す。表中の d_m は平均粒径であり、ここでは d_r として d_m を用いている。これらデータの中で、寒地土木研究所のデータを除いては、掃流砂測定器を用いて直接測られたものである。表-4はNakato^{28), 29)}がアメリカ、ミシシッピ川で観測した50個のデータである。Nakatoらの掃流砂量データのうち、小流量時に観測されたデータは、誤差を多く含むため、検討から除外した。表-5は、アメリカ、U.S.G.S.において、Helley-Smith bed load samplerを用いてアメリカの河川で観測された掃流砂データをWilliams & Rosgen³⁷⁾が整理したもので、そのうち式(8)の形で検討可能な127個のデータを用いている。表-6(a)は、我が国の土木研究所^{38), 39)}の開水路実験水路(幅1.76m, 0.78m, 水路

長114m)において測定された掃流砂データ、表-6(b)は、寒地土木研究所⁴⁰⁾の開水路実験水路(幅1m, 長さ24m)において測定された掃流砂データである。寒地土木研究所の掃流砂量は、通水中の河床高の高さの変化と上流からの供給土砂量を用いて算出している。

アメリカ河川のスリット観測データと土木研究所、寒地土木研究所の大型水路で行われた掃流砂実験のデータを用いて、無次元流量と無次元掃流砂量の関係を検討した結果を図-16に示す。掃流砂量は局所的な水理量である水面勾配 I の影響を受ける。この影響を考慮するため、無次元掃流砂量は、河道の断面形を規定する無次元流量と河道の局所的な水理量である水面勾配の積で表現する。ここでは、無次元流量に対し、無次元掃流砂量データが最もまとまる $I^{1.3}$ を乗じている。一般に、 I が、限界勾配 I_c より小さい勾配では、砂礫は移動しないと考えられる。したがって、図-16の横軸 I は、 $(I - I_c)$ で表現するのが適切であるが、ここでは I を用いている。 I_c は無次元限界掃流力を $\tau_{*c} = 0.05$ とすることにより、近似的に $I_c = 0.083d/h$ と表現できる。 I_c は、粒径/水深が相対的に大きい急流河川では考慮する必要があるが、緩流河川では実質的にゼロとなる。図-16に示された実線は、無次元掃流砂量を表す関係式で、式(9)で表される。

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sg}Id_r^5} = 0.2 \left(\frac{Q}{\sqrt{g}Id_r^5} I^{1.3} \right) \quad (9)$$

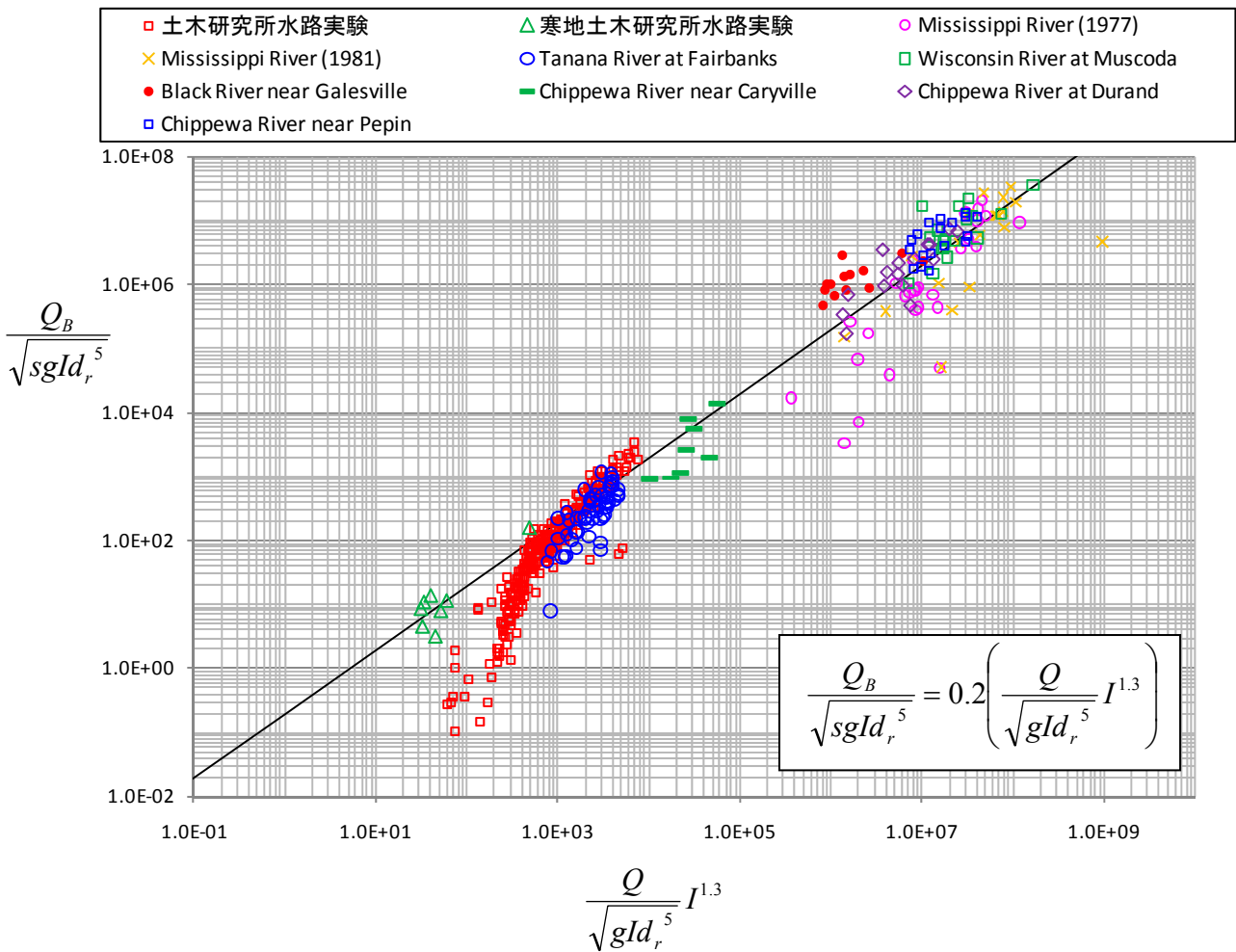


図-16 掃流砂観測値と無次元掃流砂量式の関係

式(9)は無次元河幅、無次元水深を決める無次元流量と河床勾配からなる無次元関数で表現されている。従来の無次元掃流砂量式は、流路の中心の無次元掃流力 τ_* の関数で表現されており、掃流砂量の算定には、河幅の影響が考慮されていない⁵⁾。式(9)は、無次元掃流砂量が、流量、河床勾配、粒径という無次元河幅、無次元水深等を決める式(3)、式(4)と同じ諸量からなっており、これらの代表的な諸量によって無次元河幅、無次元水深と無次元掃流砂量が同時に決まる物理的に健全で実用的な無次元掃流砂量式であると言える。以上の考察より、無次元流量は河道の無次元河幅や、断面形を決めるとともに、無次元掃流砂量に対しても重要な無次元量となっていることが分かる。

河床低下と澗筋化が進み、局所的な流れや樹林化が生じている今日の河道は、治水と環境の調和した河道とは言い難い。上流から流入する土砂を管理することによって、河床形状を制御し、水生生物の望ましいハビタットを作ろうとする調査、研究が行われ始めている^{16), 17)}。上流からの流入土砂量の制御は、流砂量に応じた河床構造を形成する。しかし、低水路にみず道や樹木等が生えた河川では、上流からの土砂が滑らか

に流下せず、土砂移動量は、河道の状況や流量規模によって異なることになる。この事実は、まずは、自然河川を念頭に、適切な河道断面を作ることから始め、その後作用する自然の営力によって形成された河道断面において、流れと土砂移動の望ましい関係を検討し、それに基づいて治水と河川環境の改善された河道を考えるのがよいと思われる。

治水と河川環境をほぼ満足する河川とは、自然河川に見られる河道である。自然河川は、式(3)、式(4)を満足することから無次元河道形成流量で形成された無次元河幅、無次元水深を有する河道において、他の流量、水位のそれぞれの水面幅に対しても、ほぼ福岡の式に従う流れの断面となっていればよいであろう。河道形成流量での河道においては、断面形、河幅に応じた掃流砂量が生じ、結果として、その断面形が維持される。このことは、それより小さい洪水流量、水位に対しても、河道形成流量でできた断面に対し、それぞれの水面幅、水深に応じた式(9)で表される無次元掃流砂量が断面内で生じ、河道形成断面がほぼ維持される安定な河道となると考えられる。このように、洪水流と掃流砂量の望ましい関係を満足する河道断面を治

水と環境の調和した河道の断面形の基準に選ぶ。このような河道断面とは、自然河川で見られるような連続な潤辺を有する船底形断面河道である。

以上から、船底形断面のような河道においては、無次元流量に対して、無次元河幅、無次元水面幅、無次元水深を決めることができ、また、その時流下する無次元掃流砂量も式(9)で算定することができる。

船底形断面のような標準的な河道断面での無次元河幅や無次元掃流砂量の算定が可能になることは、樹木が生えたり、みず道が固定化して河川管理が困難になっている河道を健全な河道断面形に改修する際の基本的な考え方を与えることになる。すなわち、多くの河川では、洪水時の流れと土砂の移動が断面内できわめて不均一に生じ、平水時の流れは、漕筋に集中し、そこでの、水生生物は、局所的な水理、土砂移動現象に規定される場で見られるもので、河川の健全な生態環境を論じるには一般性が乏しい。このため、まずは、漕筋化、樹林化し、治水上、環境上改修の必要な区間において、船底形断面河道に改修し、流れと土砂移動を健全化し、そこでの望ましい無次元河幅（水面幅）、無次元流量、無次元掃流砂量の関係を築き、河床形状と水生生物のハビタットの形成や樹木管理等について検討するのがよいと考える。

12. 地球温暖化時代の治水、利水と河川環境の関係を考えるー多自然川づくり計画に向けて

我が国の治水計画、利水計画は、明治時代以降に発生した多くの洪水、渇水の厳しい経験を経て、また国力の発展を経て今日の計画が出来ている。一方、河川環境に関しては、平成9年の河川法改正によって「環境の整備と保全」が、河川管理の目的に加えられ、これによって、我が国では、「治水」、「利水」、「環境の整備と保全」を河川管理の基本に据え、河川を総合的に管理することとしている。とはいえ、河川環境についてはその歴史は浅く、河川環境目標を作っていくことを目指しているが¹⁶⁾、治水計画、利水計画のように全国的視野に立った数値目標はなく、個々の河川において多自然川づくりを進めることを「河川環境の整備と保全」の基本としている。

しかし、河川法で規定されているように、河川の管理目標が、治水、利水、環境の整備と保全の総合的管理であることから、単に、環境目標を作るだけではなく、それぞれの計画が有機的につながるようであればならない。図-17は、平成9年の河川法改正のときに示された治水、利水、環境という河川の3機能とその相互の関係を説明する図⁴¹⁾であるが、河川計画の内

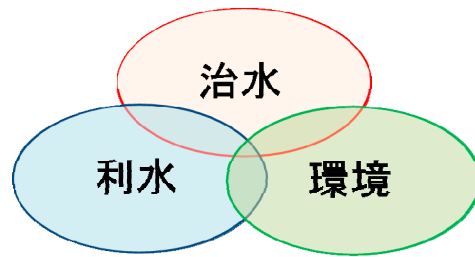


図-17 河川の3機能⁴¹⁾

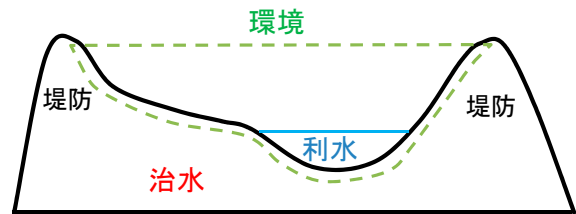


図-18 河道断面で見た治水、利水、環境の機能関係

容を示しているわけではない。地球温暖化による気候変動の時代に向かって、治水、利水、河川環境の調和した川づくりの重要性が一層高まるものと思われる。前章まで、この観点に立って、整備途上河川および地球温暖化に対応する河川の治水と環境の調和を考慮した川づくりと適応技術、河川管理のあり方を検討してきた。本章では、治水、利水、河川環境を総合的に考慮した多自然川づくり計画の考え方を議論する。

図-18は河道の横断面を用いて、治水、利水、環境のそれぞれが関係する空間を示している。治水、利水、環境を論じるには、河道空間全体にわたる議論が望ましいが、まずは、河道横断面との関係で考えてみる。検討のための外力は、洪水流量、洪水水位ハイドログラフである。治水計画は大きな洪水外力に対応する計画であり、治水による安全確保は人々の生活にとって特に重要であり、治水は横断面全体の土台を構成するものである。洪水の全時間の水位で、治水と河川環境の機能は重なり合うことから、河川環境と治水は、洪水水位のハイドログラフ全体に対して一体的に考える必要がある。河川環境と利水の機能は、河川の低い水位で重なる。断面内で重なる空間領域は相対的に小さい。図-19は、図-18の河道断面内での機能の考察を一步進めて、河道の持つ治水、利水、環境面での時間的、空間的効果について概念的に示している。すなわち、治水、利水、環境が、河川空間と時間に占める大きさを、それぞれ半径方向と円周方向にとり、効果を鉛直上向きにとっている。時間軸一周は、1年を表している。洪水時の治水の効果は、安全性の確保であり、河川環境の効果は、同じ時・空間帯での攪乱の増大、土砂の移動等による河床の活性化、水質浄化、生物活動への貢献等として評価できる。その効果は、洪水の始まりから上昇し、洪水後に徐々に減じ、平水時の河川環境状

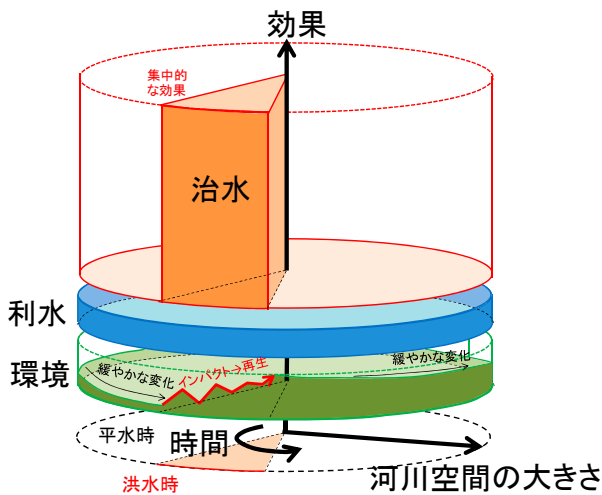


図-19 空間・時間分布で見た治水，利水，環境機能の効果の概念図

態に近づく。洪水時の全時間に占める治水，環境の効果は，パルス的であり，一方，平水時，低水時の利水と河川環境の効果は，連続的である。河川空間の大きさの効果は，洪水時には河道の縦・横断面形，平面形に関係し，洪水流の河道貯留となって流量，水位ハイドログラフを変形し，治水，利水，環境に影響を与える。平水時，低水時には，動植物の生息，生育，繁殖環境や，景観，河川空間利用等に関係する。しかし，空間の大きさの効果は，図-19では，必ずしも適切に説明しえていず，評価方法とともに今後の検討課題である。

これまで，河川環境は河川ごとの個性が高いという理由で独立して考えられることが多かった。また，洪水流量ハイドログラフの河川環境，特に生態系へ及ぼす効果については，認識はあるものの¹⁷⁾，定性的な考察に終わっており，河川環境については，平常時，低水時の環境を論ずることが多かった。しかし，河川における多くの治水・環境問題の発生，地球温暖化に伴う洪水や，渇水の大きさ，頻度への影響を考えると，河川計画は，治水，利水，環境を総合的にとらえる多自然河川計画に高めていくことが喫緊の課題である。

前章まで，自然性の高い河道断面の基準として，船底形断面形が望ましいことを示した。河道が洪水を受けると，船底形河道断面は，より自然に近い流れと土砂輸送を有する断面形に変化していく。そのような河道では，河道の平面形，縦・横断面形および洪水位のハイドログラフに応じて，水面幅，河床・河岸構造，河道内の樹木の種類や生育状況，高水敷水際構造等，固有の形態をとる。高い洪水位にあっても，水生生物が生存可能な川の作り方，単調でなく安定した水際構造，洪水流を障害しない樹木群のあり方や，生き生きとした自然性の高い河床構成材料等は，多自然川づくりの重要な検討項目であり，治水と環境面から，望ましい河道断面形を段階的に創っていくことによって，検証しな

がら質の高い多自然川づくりを進めていくことになる。

低水時のみず道の流量，水位，水面幅などは，利水計画，環境計画の基本項目である。また，自然に形成された瀬や淵，たまりやワンド等の河床地形や河床材料の粒度分布は水生生物の生息・生育環境にとって重要であり，これらの情報を利水計画，環境計画に取り込むことになる。河床高さは，船底形断面形の決め方の基準をなすことから，船底形断面形の河床高について検討することも必要になる。船底形に近い断面形を有する河道区間の樹木，草本類等の河道内植生を，一例として図-13に示したように検討し，多自然川づくり計画の参考にする。

河道の平面形，縦・横断面形と洪水流量ハイドログラフに代表される洪水流の非定常性が一体となって生ずる河道貯留は，河川で起こる固有の水理現象であるが，現在の河川計画では，河道貯留を直接的には取り込んではいない⁵⁾。河道貯留は，洪水流が波形を持って河道を流下していくときに河道内に生ずるもので，洪水伝播現象そのものである。河道貯留は，洪水時から低水時までの水の流れ方，水面の拡がり，土砂の挙動，河道微地形の形成や樹木群・草本群の生え方，ワンドの形成等に関係し，河川の3つの機能を発揮するうえで，その役割は大きく，多自然川づくりの基本となるべきものと考え^{5), 42)}。河道の安全性，健全な水環境や水生生物の生活史等の実現にも密接に関係する河道貯留の役割と効果を適切にとり入れるには，河道の平面形，縦・横断面形のあり方が重要である。前述の治水と環境の調和した横断面形に加えて，自然性の豊かな縦断面形，平面形を多自然川づくり計画に取り込むよう検討されなければならないと考える。

13. あとがき

今日の河道計画技術の課題解明と地球温暖化によって懸念される河川管理に対する適応技術について，「自然河川に学ぶ」という新しい考え方で，流域における治水と環境の調和した川づくりのための無次元河幅・水深，水面幅，断面形，掃流砂量等の基本量を導いた。そこで導かれた福岡の式は，沖積地河川の無次元河幅，水面幅，水深，断面形等が自然の力学法則によって決められていること，流域における河道形成の普遍的表示式であることを示した。無次元河幅や，無次元水深等が一つの関係式で表現できるということと，個々の河川には個性があることは矛盾しない。河川の個性は，河幅，水面幅等に現れるとともに単列砂州や網状砂州など土砂移動に伴う河道内微地形やその影響を受ける水の流れ方，木本，草本の生え方，生物の種類とその生活史，人々と川の付き合い方等に見ることがで

きる。多自然川づくりは、流域の条件から決まってくる河幅、水面幅や断面形等の大きな河川構造と其中での洪水流と土砂移動によって起こる微地形等が、関係しあって河川が出来ていることを十分認識し、河川の自然性を意識したものでなければならない。

福岡の式は、国内・国外のデータの少ない河川についても、流量、河床勾配、河床材料の代表粒径が得られれば、必要な河幅、水面幅、水深等が見積もれることから、河道計画、維持管理技術への応用性は高い。今後、我が国および海外での河川の計画や維持管理に用いるときには、その対象河川の状況、および流量、勾配などの諸量について十分検討して用い、福岡の式から得られた数値の持つ意味を理解して利用しなければならない。

本文では、無次元河幅、無次元水深とともに、掃流土砂輸送についても検討した。河川の土砂輸送量は、治水・河川環境と密接に関係しており、その重要性にもかかわらず、近年、研究対象、調査対象になることが少なかった。洪水流による安定な河幅の決定機構が決まれば、同じ機構で掃流砂量も決まるとの考えのもとに、これまで現地河川や、実験室で測られ公表されてきた掃流砂量を検討した結果、これらを説明する実用的な無次元掃流砂量式を得た。本研究を契機に、1950年代から1960年代にかけて我が国で積極的に行われた掃流砂を観測することの重要性が再認識され、河道計画に重要な流砂量観測が普通に行われるようになることを願っている。

一級河川の基準地点における基本方針河道断面は、計画に概略決められている。その断面形は、現状の河道断面形をベースに計画高水流量を流すように決めたものであり、船底形断面形のように治水と環境の調和を考えた断面形とは言い難いものも多い。基準地点および河道沿いの主要点についても船底形断面を基準として、個々の河川にふさわしい断面形に段階的に改修していくことが望まれる。特に低水路と高水敷の比高差が大きい低水路では護岸がなされており、船底形断面形に改修していく場合には、護岸部分の処理と、新たにできる水際の作り方に注意をしなければならない。

河川の高水敷利用の面からは、船底形断面河道は議論のあるところであるが、護岸設計だけといった局所的視点で河川を見るのではなく、広い視野で河川全体をみて、データをもとに多自然河川の作り方、河川管理のあり方についての技術的課題を明らかにしつつ、その後の河道の変化を湯水面、環境面からフォローアップして社会が河川に求めるものも含めて総合的に検討していくのがよいと考えている。

多自然川づくりは、治水、利水、環境を一体化した総合計画に高めることが重要である。本文で示された

考え方は、多自然川づくり計画の普遍化に向けての序論であり、治水、利水、河川環境を一体化した考え方を構築し、地球温暖化による気候変動の河川への悪影響を緩和するための対応としても重要である。適応技術とともに計画論の展開が急がれる。

謝辞：本研究を進めるに当たって、国土交通省各地方整備局河川部河川計画課から資料の提供をいただいた。また、論文を作成するにあたり、中央大学大学院生浅野文典君の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 河川便覧, 社団法人, 日本河川協会, 2006.
- 2) 水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について(答申), 社会資本整備審議会, 2008.
- 3) 我が国における気候変動の現状と見通し, 気象庁, 2008.
- 4) 総合的な豪雨災害対策の推進について, 社会資本整備審議会河川分科会, 豪雨災害対策総合政策委員会, 2005.
- 5) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 6) 福岡捷二: 石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋, 第44回水工学に関する夏期研修会講義集, Aコース, pp.1-25, 2008.
- 7) 福岡捷二: 土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術—実務上の課題と調査・研究の方向性, 河川技術論文集, 第14巻, pp. 1-6, 2008.
- 8) 吉川秀夫: 河川工学(改訂増補版), 朝倉土木講座17, 朝倉書店, 1993.
- 9) 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形状とそのスケール, 土木学会論文集, 第375号, pp.117-126, 1986.
- 10) 山本晃一: 構造沖積河川学—その構造特性と動態—第7章, 山海堂, 2004.
- 11) Bray, D. I.: Estimating average velocity in gravel-bed rivers, *J. Hydraulics Div. ASCE*, Vol. 105, HY9, pp. 1122-1130, 1979.
- 12) Kellerhals, R., Neill, C. R. and Bray, D. I.: Hydraulic and geomorphic characteristics of rivers in Alberta, *River Engineering and Surface Hydrology Report*, 72-1, 1972.
- 13) 国土交通省河川局監修, 国土交通省河川砂防技術基準 同解説, 計画編, 技報堂出版, 2005.
- 14) 河道計画検討の手引き, (財) 国土技術研究センター編, 山海堂, 2002.
- 15) 多自然川づくりへの展開, 多自然川づくりレビュー委員会, 2006.
- 16) 中村 太, 辻本哲郎, 天野邦彦 監修: 川の環境目標を考える—川の健康診断—, 河川環境目標検討委員会, 技報堂出版, 2008.
- 17) サンドラ・ポステル, ブライアン・リクター (山岸 哲, 辻本哲郎 共訳): 生命の川, 新樹社, 2006.
- 18) 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.
- 19) 福岡捷二: 巻頭言, これからの河川管理を考える—自然河川に学ぶ, 河川, 66巻, 第3号, pp.3-9, 2010.
- 20) 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, 河川技術シンポジウム, 第16巻, pp.5-10, 2010.
- 21) 白井勝二: 利根川河道(八斗島〜取手)の変遷と護岸, 水制に関する研究, 中央大学博士論文, 2010.
- 22) Natural Resources Canada: Canadian Landscapes Photo Collection, <http://www.nrcan-rncan.gc.ca/com/> (参照: 2010/05/06).

- 23) 平野宗夫：拡幅を伴う流路変動について，土木学会論文報告集，第 210 号，pp.13-20, 1973.
- 24) 福岡捷二，山坂昌成：なめらかな横断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 号/II-2, pp.87-96, 1984.
- 25) 国土交通省ホームページ，河川整備基本方針検討小委員会会議資料，http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/index.html
- 26) Schumm, S. A.: The shape of alluvial channels in relation to sediment type, *US Geological Survey Professional Paper*, 352-B, 1960.
- 27) Nakato, T.: Test of selected sediment-transport formulas, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No.3, pp. 362-379, 1989.
- 28) Nakato, T. and Kennedy, J. F.: Field study of sediment transport characteristics of the Mississippi River near Fox Island (RM 355-6) and Buzzard Island (RM 349-50), *IJHR Report*, No. 201, Iowa Institute of Hydraulic Research, 1977.
- 29) Nakato, T. and Vadnal, J. L.: Field study and test of several one-dimensional sediment-transport computer models for Pool 20, Mississippi River, *IJHR Report*, No. 237, Iowa Institute of Hydraulic Research, 1981.
- 30) U. S. G. S.: Sacramento River Basin NAWQA Program, <http://ca.water.usgs.gov> (参照: 2010/05/06)
- 31) 松本将能，工藤美紀男，福岡捷二：平成 20 年 8 月浅川洪水（多摩川水系）による土丹河床の大規模洗掘と河道管理方策，河川技術論文集，第 15 巻，pp. 285-290, 2009.
- 32) 忠津哲也，鈴木研司，内田龍彦，福岡捷二：洪水流による土丹河床高さの経年変化と堰周辺の砂州変形に伴う洗掘深の増大について，河川技術論文集，第 15 巻，pp. 249-254, 2009.
- 33) 福岡捷二，寺沢直樹，山崎憲人，塚本洋祐：巨石を有する礫床河川の水利，河川技術論文集，第 13 巻，pp. 339-344, 2007.
- 34) 須賀正志，前嶋達也，藤本昌利，長田健吾，福岡捷二：澁筋化・低下した石礫河川の河床高回復技術の開発研究，河川技術論文集，第 15 巻，pp. 273-278, 2009.
- 35) 浅野文典，福岡捷二：河道特性と流砂量の関係についての基礎的研究，第 37 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，II-67, pp.177-178, 2010.
- 36) 浅野文典，福岡捷二：安定断面形状を有する流路の掃流砂量に関する研究，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，第 II 部門，2010.
- 37) Williams, G. P. and Rosgen, D. L.: Measured total sediment loads (suspended loads and bed loads) for 93 United States streams, *U. S. Geological Survey Open-File Report*, 89-67, 1989.
- 38) 佐藤清一，吉川秀夫，芦田和男：河床砂礫の掃流運搬に関する研究 (1)，土木研究所報告，第 98 号，pp.1-18, 1958.
- 39) 吉川秀夫，福岡捷二，馬場亨，河野二夫：大粒径砂礫の掃流砂量に関する研究，水理講演会論文集，pp.1-6, 1975.
- 40) 小川長宏，渡邊康玄：河川上流域の中礫を用いた掃流砂量測定実験，水工学論文集，第 47 巻，pp.535-540, 2003.
- 41) 国土交通省河川局パンフレット，1998.
- 42) 河川環境目標検討委員会：ワークショップ河川環境目標へのアプローチは可能か—考え方と実態—報告書，2005.
- 43) 前嶋達也，岩佐将之，長田健吾，福岡捷二：石礫複断面河道における流れ，縦横断面形状，河床材料分布に及ぼす河道平面形状の影響，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，第 II 部門，2010.

(2010. 5. 6 受付)

Firstly, as a representative realization of water-related disasters due to the global warming, emphasis is placed on the importance of river maintenance works as well as river improvement works for reducing flood disaster damages in Shikoku Island that was struck by 6 severe typhoons in 2004. Secondly, a dynamic equation (Fukuoka equation) describing a relationship between dimensionless river width, dimensionless depth and dimensionless discharge was derived on the basis of data of natural rivers in Japan and Canada and the first class rivers in Japan. Fukuoka equation derived thus suggests that a desirable river cross section for flood control and river environment should be a cross-section shaped like a ship bottom and dimensionless sediment transport rate be shown to be regulated by the same mechanism as the determination of dimensionless width and depth of the stable river.

Finally, the framing of comprehensive plan of close-to-nature rivers for the harmonization of flood control and river environment is discussed as well as methods of river engineering adaptation in the global warming age.