

これからの河川管理を考える—自然河川に学ぶ

A New Perspective on River Management -Lessons from Natural Rivers



ふくおかしろうじ
福岡捷二*
Shoji Fukuoka

1. まえがき

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なわれてきたが、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について考えてみる。

河川にはそれぞれの個性がある。川の個性は、川づくり、河川管理においても尊重されなければならない。川の個性で重要なことは、自然によって付与されている個性である。このことは自然がどのようにして川を作ってきたのかを調べ、それを認識することが川の個性を尊重することにつながる。

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。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表れてきている¹⁾。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。これらの問題解決の方向は、流域からの洪水流や土砂流出などの自然性を考慮に入れ、治水上、環境上から見て望ましい河川断面形や河幅、水面幅の決め方を検討することにある。近い将来、地球温暖化による洪水流量増大の可能性が高まることを考えると、水面幅、断面形の決め方は喫緊の課題である。

本文では、自然が作る河川を大きくとらえたときに、河川の特徴はその平面形、縦横断面形に現れ、河幅、断面形の決まり方に自然の力学法則が作用しているとの考えのもとに、我が国109水系の一級河川基準地点とカナダ、アメリカにおける多くの自然河川における無次元河幅、無次元水深が、流域の洪水と河道状況から決まる無次元流量によって一義的に表現できることを示す。次に、導かれた無次元河幅、水深等の表示式は、治水と環境の両面から望ましい川づくりと河川管理の有効な判断指標となること、望ましい標準的な横断面形は、船底形断面形であること、それらを具体的に実行するためにはどのようなデータを収集し、どのような検討が必要であるか等について述べている。

2. 計画高水流量まで考慮した多自然川づくり、河川管理のために

平常時の川では、最も目を引くのは河幅とその

* 中央大学研究開発機構教授
Professor, Research and Development Initiative, Chuo University

中に見える水面幅である。改修が行われている河川の現場では、広げた河幅と護岸である。平常時の河川を見ると、十分大きな断面形、河幅を有しているのに、なぜ、さらに改修が必要であるのか多くの人々は理解出来ないと思われる。災害を受けた河川では、技術者は計算機を用いた複雑な解析結果から、水位が高くなりすぎるので川幅を広げなければならないと説明する。この場合、現在の河川断面形、水面幅を前提として、河川の改修の必要性を語ることになる。専門家には、断面形が論理的に決まっていることを理解してもらえても、非専門の人々には、現在の河幅、断面形が流域の状況や川の持つ本来の特性から見てどのような問題があり、なぜ改修が必要かの説明が必要である。河川流域の特性や、その中での河川のあるべき姿の議論を行わずに、現在の河川の計画、管理の延長上での説明では、十分理解をしてもらえないと思う。近年の河川事業への風当たりの強さは、このこととも関係しているように思える。

我が国では、川づくりも河川管理も多自然で進めていくことを原則としている。多自然川づくりの理念は、治水と環境の調和を目指しているが、現在の多自然川づくりは、大洪水を十分意識したうえでの治水と環境の調和になりえていないように思う。流域スケールでの計画流量規模を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。河川流域という大きなスケールから決まってくる自然性には、自然環境という素晴らしさとともに、自然の脅威もあることを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。

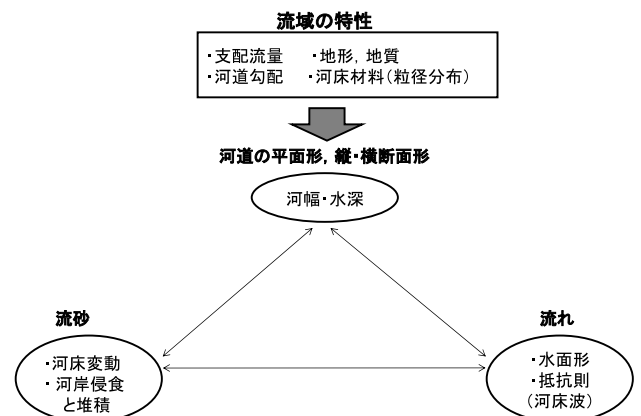
3. では、流域スケールで見た多自然川づくりを念頭に、多自然川づくりの重要な要素である河幅、水面幅、断面形が流域における洪水流と河道特性量の間どのような力学関係で決まっているのかを国内・国外の河川から明らかにする²⁾。

3. 治水と環境の調和した河幅・水深を規定する無次元流量—自然河川に学ぶ

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り、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。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、〈図—1〉に示すように、支配流量（およそ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。河道を作った支配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、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。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



〈図—1〉 安定な河道形成の力学関係

とたび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。通常の洪水によって発生する河岸浸食や河床変動等は安定な河幅のもつ変動幅の中で起こっている水理現象とみなされるものである。

上述の安定な断面形が成立すると、河幅、水深で代表される断面形は、流量、河床勾配、河床材料の粒径等、以下の8つの独立な物理量で表現できる。

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

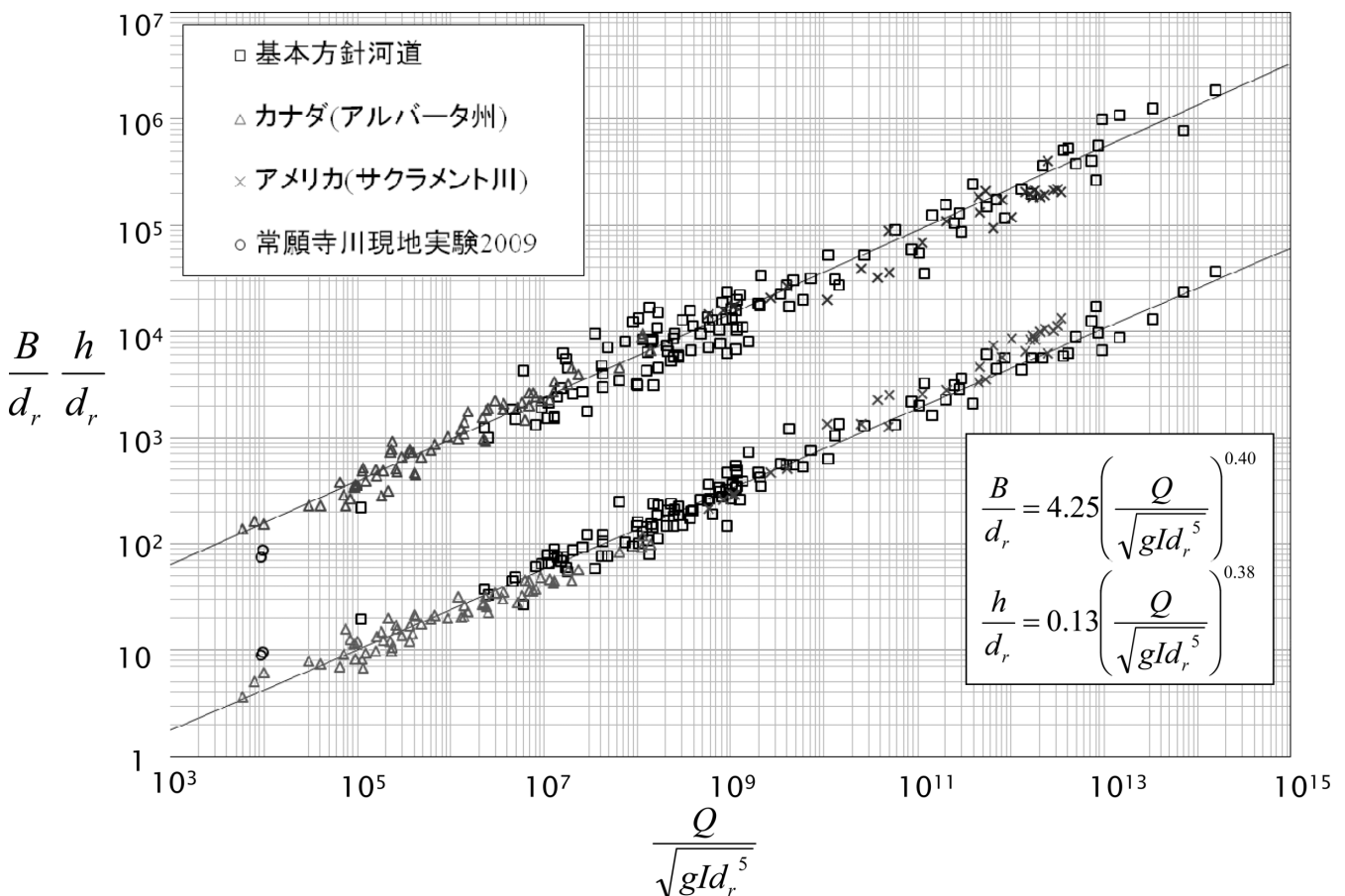
ここで、Q：流量、B：河幅（水面幅）、h：水深、I：水面勾配または河床勾配、 d_r ：代表粒径、g：重力加速度、 ρ ：水の密度、 σ ：河床材料の密度であり、流域の地形、地質の影響は、河床材料の代表粒径と河床こう配で表わされてい

る。式（1）に次元解析法を適用すると、これらの8個の独立量から次に示す5個の無次元量が導かれる。

$$\phi \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5}, \frac{B}{d_r}, \frac{h}{d_r}, I, \frac{\sigma}{\rho} \right) = 0 \quad (2)$$

第一項は河道と洪水の状況を表す無次元流量であり、第二項は無次元河幅（水面幅）、第三項は無次元水深である。このように力学的に考察した無次元表示をすることにより、河道や洪水流の規模に関係なく、安定な河道断面形が力学的に統一して説明できることを以下に示す

最初に、一級河川の基準地点の洪水流と河道データを用いて、式（2）の無次元量間の力学関係を検討する。基準地点は高水計画や低水計画を検討する重要な地点であることから、一級河川の基準地点区間の河道は、ほぼ完成断面を有してお



〈図—2〉基本方針河道と海外の自然河道の比較

り、ここでは洪水流や河道特性の観測値が長期間にわたって集められている。検討に用いる代表河床材料は、重量で60%通過粒径 d_{60} とし、勾配は、基準地点付近の平均的な河床勾配を用いている。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計画高水流量で、河積、河幅、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時の計画高水位の縦断面形から求めている。複断面形を有する河道の水深は、断面平均水深を用いている。

基本方針河道の無次元河幅、無次元水深に対する無次元流量の関係を〈図—2〉に示す。この図より、109水系基準地点の無次元河幅と無次元水深は、それぞれ計画高水流量、河床勾配、河床材料の代表粒径からなる無次元流量の関数として式（3）、式（4）で表現出来る。

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

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

なお、河床勾配がほぼ水平な河口に近い部分については、水面勾配を用いる。以下では、式（3）、（4）を福岡の式と呼ぶ。

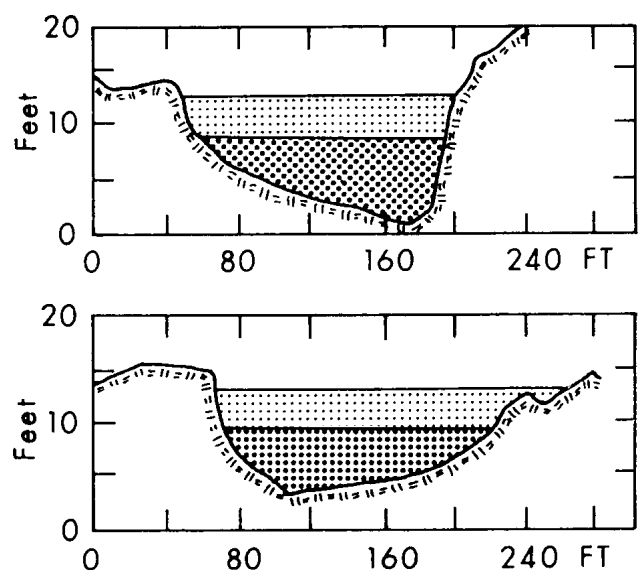
次に、福岡の式をカナダ、アメリカの自然河川に適用し調べる。カナダ、アルバータ州政府とBrayが調査したアルバータ州を流れる67個の自然河川データ、Nakatoの研究で用いられているアメリカ地質調査所の29個の河川データを用いる。

Brayらは、bankfull discharge（低水路満杯流量）に相当する2年確率流量により河道が安定状態になっているとの考えのもとに、自然河川の安定な水面幅、水深を求めている。自然河道の典型的な安定横断面形は、〈図—3〉に示すように船底型の断面形をなしている。カナダの自然河道においても我が国の基本方針河道と同様に、福岡の式に示す無次元関係で表わすことが出来ることを

〈図—2〉は示す。（相関係数は、式（3）は0.80、式（4）は0.86である）。Nakatoにより用いられている米国サクラメント川の洪水データによれば1960～1978年の19年間の観測では、bankfull discharge（2270m³/s）は12回起こっており、年最大流量は、ほぼbankfull discharge相当流量と考えられる。〈図—2〉よりサクラメント川でも福岡の式が成立することが分かる。〈図—2〉中には、常願寺川河川敷に作られた石礫河床からなる大型複断面現地実験水路（水路長120m、河幅8m、水面勾配1/120、代表河床粒径8cm）における流れから求められた無次元水面幅、無次元水深も式（2）、（3）でほぼ説明できることが分かる。

このように、基本方針河道に対して導いた関係式が、海外の自然河川を含め種々のスケールの洪水及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。福岡の式が一般性を有する理由は以下に示すように幾つか考えられる。

世界の川はいろいろな河道形状、河床形態をしており、一見すると河幅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、河川流域スケールと関係する大流量、勾配、河床材料の下で形成されたもので、それは、大きな河幅、大きな水深の河道と考えるのが自然である。したがって、相対的に水深



〈図—3〉カナダの自然河川に見られる船底形断面形

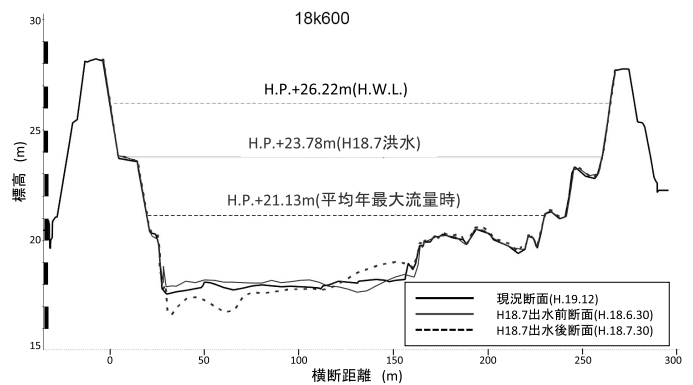
が低い洪水時に見られる砂州等に起因する流れの蛇行がもたらす河床や、河岸の洗掘量は、自然が決めた河幅に比べるとわずかな変化量であり、これは河幅一定の下での安定な幅の中での変動とみなすべきである。アルバータ州の自然河道では、2年確率流量より大きな洪水流量も発生しているが、bankfull dischargeに相当する2年確率流量で安定した河道（常水路）が形成されている。我が国の109水系の基本方針河道では、109のうちの80%の基準地点で計画高水流量の80%を超える大きさの既往最大流量が発生している。このことは、基準地点では、これまで計画高水流量規模の大洪水が生じ、それに対応した洪水・土砂移動によ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、度重なる河川災害を経験して技術者が自然の外力の大きさを認識し、自然から学びながら引堤等川幅の拡幅等を行い、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を流下させる河道がほぼ出来つつあり、その状態に対して河岸に護岸をして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ことができる。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、その無次元流量に対する無次元水面幅、無次元水深が、自然河道の無次元流量に対する無次元水面幅、無次元水深と同じ関係で説明できることは、基本方針河道もその断面形は自然性を有し、動的に安定な自然河道のそれに類似していると言える。

4. 治水と環境の両面から望ましい多自然河道の横断面形は船底型断面を基準とする

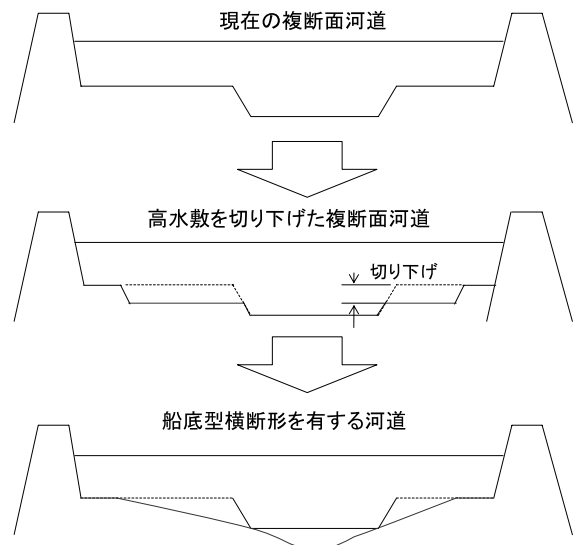
我が国の中・下流部で河道の標準断面として用いられている複断面河道は、河川を生活の場とする生物にとっては空間的連続性が低く、必ずしも好ましい状況とはなりえていない。「まえがき」にも述べたように、近年、高水敷と低水路の比高差が大きくなり、治水上、環境上望ましくない状況が顕れてきている。さらには、気候の温暖化は、洪水流量の増大をもたらすとされており、

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断面形状が求められている。

カナダやアメリカの自然河道の多くはく図—3>に見られるように船底型横断面形をしており、水面幅や水深は式(2)、(3)を満足している。我が国の基本方針河道形状が、ほぼできている基準地点の横断面形もまた、川が有する自然の機能によって船底型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く図—4>に示す。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、船底型断面形を標準形として、そこ



く図—4> 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）



く図—5> 複断面河道から船底形断面河道への段階的改修の一例

に川が川をつくる自然の作用が加わり、それぞれの河川に適した断面形をとることを期待している。〈図—5〉には、複断面河道から船底型断面河道へ段階的に改修していく状況を模式的に示している。この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、河川自らが自然的な川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。このような段階的改修は、多自然川づくり、地球温暖化による流量増に対応するとともに、堤防付近の流速を低減できる程度の高水敷を残すことで堤防の安全性を確保するものである。船底形河床形状が、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である。〈図—4〉のすでに基本方針河道となっている斐伊川河道区間の例では、これまで規模の異なる洪水を度々経験し、船底形に近い横断形状をとっている。洪水前後の河道断面形の変化の状況から、河道は動的安定が保たれていることが分かる。みず道の形成や河道の動的安定については、河床材料粒径と掃流力分布の関係及びこのような実洪水により検討することが可能である。一方で、船底型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水位に応じた河道横断面の冠水頻度をとることとなり、これによって浸水深に応じた樹木の種の形成と河道内樹木の繁茂拡大を防ぐ。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。河道内樹木やその維持管理については、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われるよう水辺の環境情報を積み上げていくことが望まれる。

5. 多自然川づくり、河川管理への適用

〈図—2〉の縦軸と横軸スケールの範囲が示すように、福岡の式は、非常に広く変化する無次元水面幅、無次元水深と無次元流量について成立する力学関係式となっていることから、小河川から大

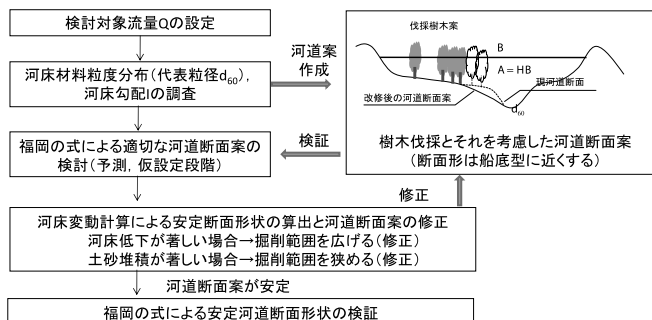
河川まで、また小規模改修から大規模改修までの改修断面形、河幅、水面幅、水深を議論するうえで重要な判断指標を与える。本式は、自然河川でも成立する式であるので、低水路内の滯筋水面幅、低水路水面幅、全河幅といった河幅の変更に対応する河道の断面形について治水と環境の調和を考慮して決めるための一つの判断方法を与える。今日課題となっている河川管理、河川事業への具体的な適用として、以下のものが考えられる。

- ・ 樹木群の繁茂した河道における樹木の伐採範囲と伐採後の河道の縦・横断面形、水面幅、水深。
- ・ 河道の滯筋化、河床低下による構造物等の安全性低下を軽減する河道の縦・横断面形、水面幅、水深。
- ・ 中小河川における多自然川づくりにおける河道の縦・横断面形、水面幅、水深。
- ・ 河川事業における改修の必要性、改修の効率化と事業の優先順位の検討。

〈図—6〉は、洪水流の流下を阻害する樹木群の伐採範囲と伐採後の河道縦・横断面形、水面幅の決め方に対し、式(3)、(4)の適用方法をフローチャートで示す。

上記の当面重要な4課題の他に、これからの河川管理の主要課題である計画高水流量規模の洪水流まで含めた多自然川づくりとしての河幅、断面形や地球温暖化による洪水流量の増分に対応する河道断面形の決め方等に適用し、問題の解決を図ることが望まれる。

河道内樹木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



〈図—6〉 無次元水面幅、無次元水深に関する 福岡の式の適用例

6. 検討のために必要なデータと留意事項

福岡式が示すように、無次元水面幅や河幅の決定には、無次元流量を構成する支配流量、河床勾配（水面勾配）、河床材料の粒径が必要となる。特に、対象河道区間を代表する河床材料を採取する位置の決め方や河床材料分布を適切に測定する技術を確認しなければならぬ。福岡式は、データの少ない国内・国外の河川についても、支配流量、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になり、その応用性は高い。

一級河川では、基準地点における基本方針河道断面は概略決められている。その形は、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断面形であり、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。基準地点及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を検討することが望まれる。特に低水路と高水敷の比高差が大きい低水路で護岸がなされている断面を、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。

7. あとがき

自然の作用で造られた河川は、その特徴を表す平面形、縦横断面形、特に、河幅、水面幅、断面形は自然の力学法則によって決められていることを示した。福岡の式は、沖積地河川に対する自然の外的要因の力学的考察から導かれた普遍的関係式であるといつてよい。しかし、無次元形で表現された河川断面形が一つの関係式で統一的に表現できても、個々の河川には、明確な個性が現れている。それらは、単列砂州や、網状砂州などの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である。これからの河川管理が、川のでき方とその個性を意識した自然河川に学ぶ多自然河川管理でなければならない理由は、ここにあると考える。

治水と環境の調和を考えた多自然の河道断面を規定する関係式は、洪水流の現場で観測された流量、河床勾配（水面勾配）、河床材料粒径や水面幅、水深等からなり、これらには誤差を含むにもかかわらず、国・内外の河川のスケールや、洪水特性、河道特性の異なる河川の河幅、水面幅、水深に統一的な説明を与えている。式（3）、（4）に含まれる係数やべき乗数についてはさらにデータを積み上げて検討する必要があるが、おおむね、式（3）、式（4）でよいと考えている。これらの式は沖積地河川に適用するもので、粘着性の高い河岸材料からなる河川、岩河道の河川は、当然ながら式（3）（4）では表現できず、ここではデータから除外されている。

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、実際のデータをもとに多自然河道の作り方、河川管理の在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渇水面、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。

参考文献

- 1) 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、Vol.14、pp.1-6、2008年6月
- 2) 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年2月