

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形の決め方

STABLE RIVER WIDTH AND DEPTH IN ALLUVIAL RIVERS
—DETERMINATION OF RIVER CROSS-SECTION AIMING AT THE HARMONY
BETWEEN FLOOD CONTROL AND ENVIRONMENT

浅野文典¹・福岡捷二²

Fuminori ASANO and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー 工博 Ph.D 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)

Determination of stable river cross-section such as width and depth is important issue in river planning. In the past, river width has been determined by empirically rather than theoretical way. It may have a dynamic relationship between discharge, river bed slope and river bed material when river cross-section becomes stable. In this study, the authors aim to propose a way to determination of stable cross-section form based on field data of Japanese rivers. First, we investigate relationship among dimensionless quantities by dimensional analysis. Next, we derived equations between dimensionless quantity of width, depth and discharge. Then, adequacy of the equations is confirmed by river data in Canada and America. Finally, we showed that the proposed equations were useful for a stable river course design.

Key Words : flood, natural river, stable cross-sectional form, dimensional analysis, dimensionless discharge

1. はじめに

河川の安定な川幅を決めることは、河川計画上最も重要な技術的課題の一つである。我が国の河川では、これまで川幅等を理論的に決めてきたというよりも、明治以来の洪水氾濫や河道災害を受けることによって、その時々、被災流量を安全に流すように、河川技術者の判断に基づいて河道の拡幅をするなどして、河道断面形がつくられてきたと思われる。新しく河道を開削した場合には、流量によって河道断面形や河床勾配、河床材料が変化する場合が考えられるが、長期間にわたって数多くの洪水を受けることで、流量、河床勾配、河床材料といった諸量間の力学関係が成立するような安定な河道断面が出現したと考えられる。すなわち、安定な河道断面形状となった時の断面形は、その河道区間の支配的な流量、河床勾配、代表的な河床材料粒径の間に定まった力学関係が成立しているものと思われる。

安定な河道断面形状について、古くから経験的に導かれた多くのレジーム論¹⁾があるが、これらの式は個々の

川について経験に基づいて導かれたもので、一般的に成立するものではない。安定河道断面の水理的考察に基づく池田ら²⁾の提案式は、注目に値するが、多くの河川に対して、適切に説明できる式とはなっていない³⁾。

今日、問題となっている河床の二極化、すなわち深掘れ部分と堆積部分が顕著に分かれた河道が全国でみられ、河道の安全性の低下が懸念されている。そこでは、堤防沿いに深掘れ、濡筋化が現れ、危険な状態となっており⁴⁾、一方において、堆積部には樹木が繁茂し、実質的な川幅を減じ、流下能力を低下させている⁵⁾。このような河道を改修するには、河床材料に見合った河幅に段階的に改修していくことが望ましいが、川幅を決める根拠が明確にされていない。実際に、多摩川やその支川の浅川では、軟岩が露出し、構造物の安全性の低下が問題となっており、現地に即した河床高回復技術の確立が求められている^{6,7)}。多自然川づくり⁸⁾においても、河川が有している自然の復元力を活用するため、川幅は出来るだけ広く確保するよう努めると述べているにとどまっている。今後の気候変化による洪水外力の増加に対し、河道の流下能力の向上が求められるが、治水と環境の両面を

考え、どのような河道断面に改修すべきか明確な考え方をもち得ていない。

本研究の目的は、治水と環境の調和した安定な河道断面の決定法を提案することである。著者らは、治水と環境の調和した望ましい河道断面とは自然河川の河道断面に近いものと考えている。本論文ではまず、次元解析により河道断面を支配する無次元量の関係を検討する。つぎに、我が国の一級河川基準地点でのデータを用いて、無次元水面幅、無次元水深と無次元流量の関係式を導く。そして、自然性や洪水規模の異なるカナダ、アメリカとの自然河川データを用いて同様に検討し、我が国の河川において導かれた関係式と比較し、安定した河道断面について考察する。さらに、利根川における現況河道断面での実績洪水に対して、導いた関係式の持つ意味を検討する。最後に、今後の川づくりの方向として、温暖化による洪水流量の増大を念頭に置いた治水と環境の調和した河道断面形について論じる。

2. 安定断面形状を規定する無次元量間の関係

安定な河道とは、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と定義する。一度、この安定な河道断面形が決まると、洪水流と、流砂と、河道断面の間の相互作用の中で、変動はするが、河道の安定状態は継続するものをいう。安定な河道断面形は、洪水流を規定する量と河川構造から決まると考える。すなわち、河道の断面形状を川幅と水深で代表すると、安定な断面形は流量、河床勾配、河床材料特性等、以下の8つの独立な物理量に規定される。

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

ここで、 Q : 流量、 B : 水面幅、 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。

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

重力加速度は、河床勾配と組み合わせることで、流下方向に作用する力の成分としている。第一項は洪水の状況を表す無次元流量であり、第二項は無次元水面幅、第三項は無次元水深である。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3. 以下の章で示す。

3. 一級河川基準地点における無次元量の関係

(1) 一級河川基準地点における計画断面諸量

最初に、一級河川の基準地点を対象に検討を行う。基準地点は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、多くの一級河川の基準地点では河道がほぼ完成し、洪水流や河道の観測値が長期間にわたって集められている。河床材料は、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。河川の特徴により、河道安定に影響を及ぼす粒径集団は異なるが、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時のデータを用いて、式(2)の無次元量間の関係を調べる。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時の計画高水位の縦断面から求めている。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。

(2) 基本方針河道における無次元量の関係

断面形状としての無次元水面幅、無次元水深に対する無次元流量の関係を図-1、図-2に示す。これらの図より、基準地点の無次元水面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の組み合わせから決まる無次元流量により決まると言える。ここで独立変量 II は、無次元流量 $Q/\sqrt{g}I d_r^{5/2}$ の中で g との結合 gI で考慮されており、また、水と土砂の比重 σ/ρ については一定値として扱えるため、検討から除外した。図-1に示した無次元水面幅と無次元流量の関係は、強い相関を有しているが、ある程度のばらつきの中にある。この主たる原因は、無次元水面幅、無次元水深に、断面の形状が考慮されていないためである。そこで、図中には、断面形状を区別するため、複断面形と単断面形に色分けしてプロットしている。図中に示している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いる。特に、大きく下側に外れている河川は、富士川、天竜川、黒部川、吉野川、球磨川等の河岸、河底に岩が露出している河川である。これらの河川は、その地形の影響により、本来の安定な川幅まで広がることができず、他の沖積河川に比べ川幅が狭く、その逆に水深が大きくなっている。これらの特異な河川のデータを除き近似式を求めると、式(3),(4)に示す関係式が導かれる。

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g}I d_r^{5/2}} \right)^{0.40} \quad (3)$$

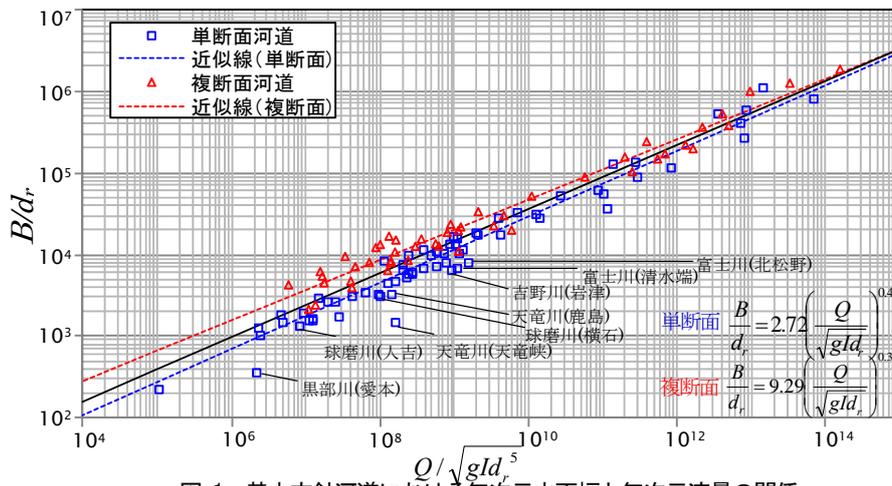


図-1 基本方針河道における無次元水面幅と無次元流量の関係

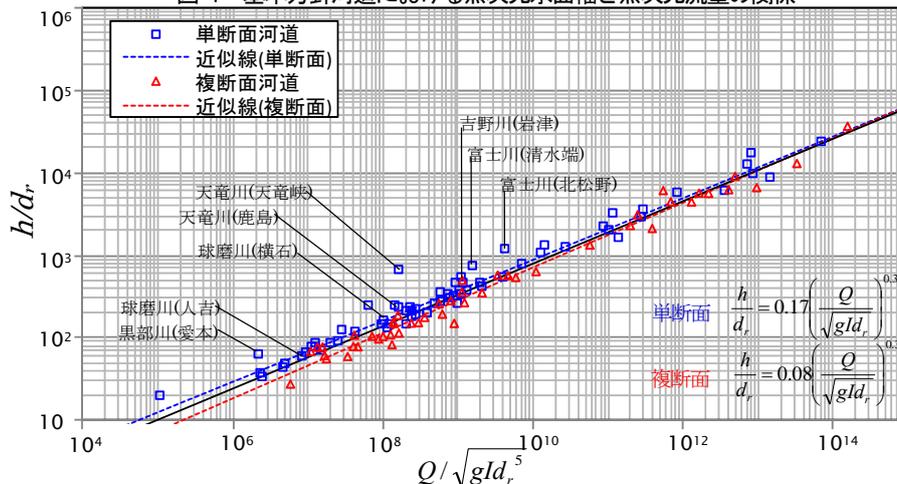


図-2 基本方針河道における無次元水深と無次元流量の関係

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

実際には、河床材料は河床勾配や流量とも関係しているが、安定した河道の断面形は、流量、河床勾配、代表粒径それぞれの量から決まるのではなく、 $Q/\sqrt{gld_r^5}$ という無次元量の形で決まると考えるべきである。

4. 海外の実績洪水を用いた無次元量の比較

前章で得られた無次元水面幅、無次元水深と無次元流量の関係を、外国の河川に適用する。Bray⁹⁾の研究で用いられているカナダ、アルバータ州政府の67個の河川データ^{9),10)}、Nakato¹¹⁾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。各データの詳細については文献^{9),10),11)}を参照されたい。

まず、カナダのアルバータ州を流れる自然河道についてのBray^{9),10)}のデータを検討する。Brayは、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、安定礫床河川の平均流速の算定法を検討している。本研究においては、同様に、2年確率流量を用いて自然河川の安定な水面幅、水深に

ついて検討する。図-4に示すように安定な自然河道の横断面形は船底型横断面形をなしている。図-3から、自然河道においても基本方針河道と同様に、式(3),(4)に示す関係があり、高い相関で表わすことが出来る。(相関係数は、式(3)は0.80、式(4)は0.86である)しかし、基本方針河道に比べ自然河道ではばらつきが小さい。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、様々な地勢条件の場に定められているのに対し、Brayの自然河川は礫床河川を対象としているためであると考えられる。米国サクラメント川の洪水を整理したNakato¹¹⁾により用いられている29個のデータは、流量範囲 $142\text{m}^3/\text{s} \sim 2243\text{m}^3/\text{s}$ である。1960~1978年の19年間の観測では、bankfull discharge ($2270\text{m}^3/\text{s}$)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-1より、我が国の河道に比べ、自然河道に近い河相となっていることがわかる。図-3より、サクラメント川でも式(3),(4)に示す関係が成立することがわかる。

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、河道に対しても同様に成立することは、大変興味深く、意義深いことである。その理由は幾つか考えられる。アル

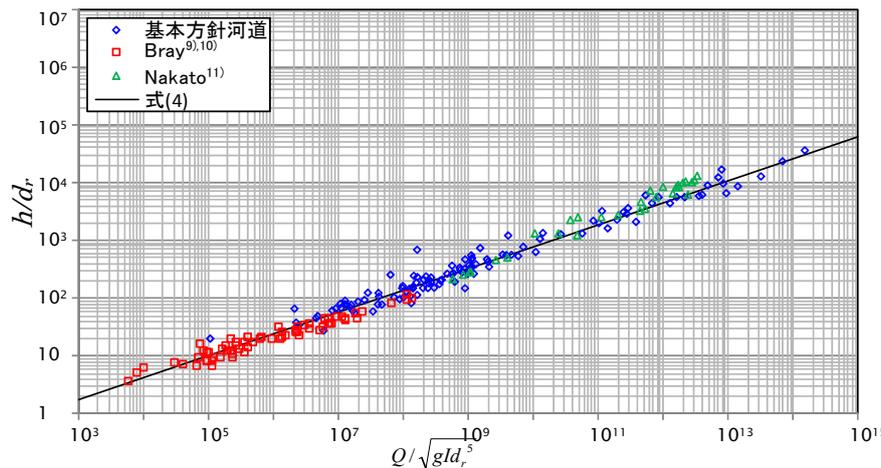
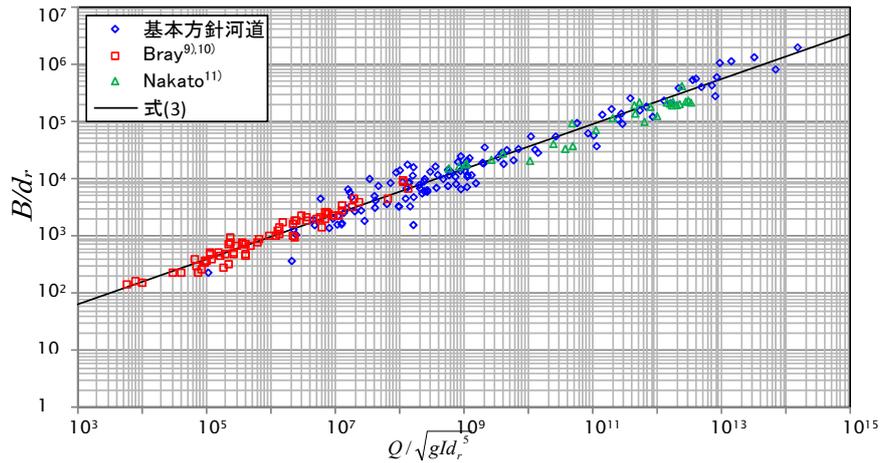


図-3 基本方針河川と海外河川の無次元量間の関係

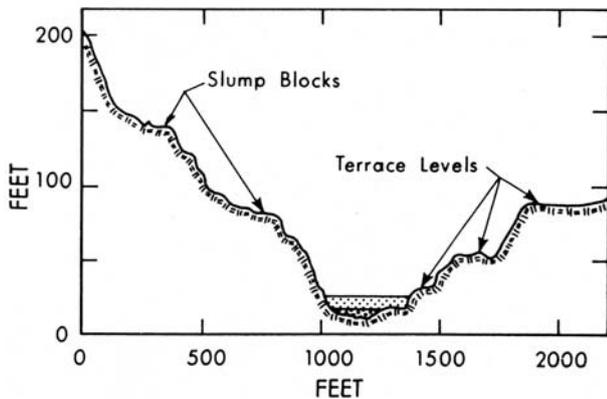


図-4 自然河道の横断面¹⁰⁾



写真-1 サクラメント川(Colusa)¹²⁾

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に相当する2年確率流量で安定した河道が形成されており、2年確率流量に対応した断面形状を有する河道となっている。一方、我が国の109水系の基本方針河道では、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。このことは、多くの基準地点で、計画高水流量に近い規模の洪水が生じ、それに対応する洪水・土砂移動により安定した河道が形成されている。これは、基準地点が河川計画の基準となる地点であることから、明治以来、度重なる災害を通して先人技術者が河川災害と戦いながら川幅の拡幅等を行い、再

度災害防止に努めてきた結果と密接に関係している。基本方針河道は、自然河道と同様な無次元流量に対する無次元水面幅、無次元水深の関係が成立しており、研究目的で述べた望ましい安定河道となっているといえる。

5. 実績洪水時の無次元量の時系列変化

3. では、基本方針河道において計画高水位を想定し、無次元流量と無次元水面幅、無次元水深の関係について検討を行った。実際に起こった大きな規模の洪水に対しても、同様に関係が成立するかを、現在の利根川の河道

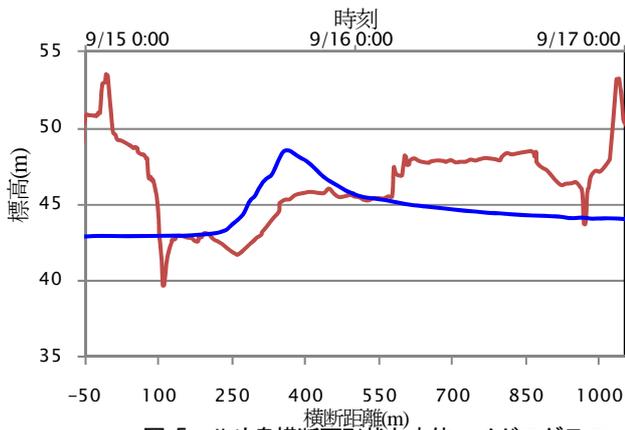


図-5 八斗島横断面形状と水位ハイドログラフ

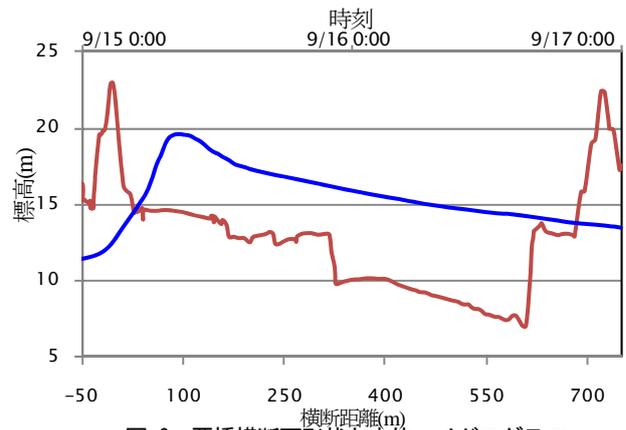


図-6 栗橋横断面形状と水位ハイドログラフ

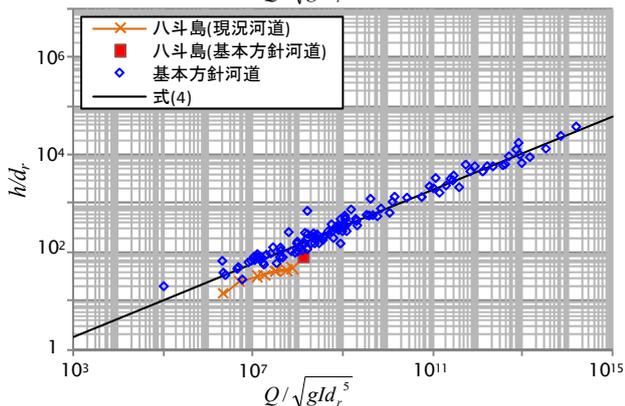
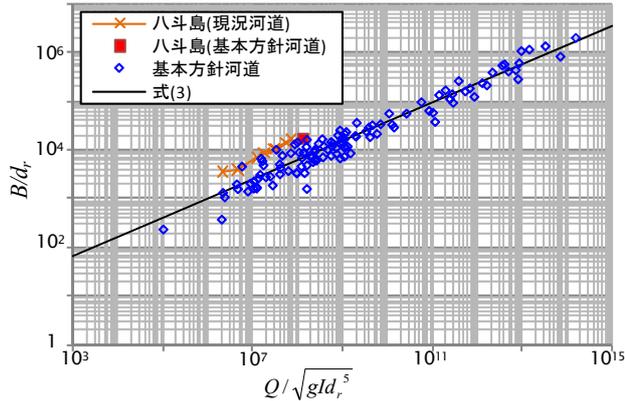


図-7 無次元量の時間変化(八斗島)

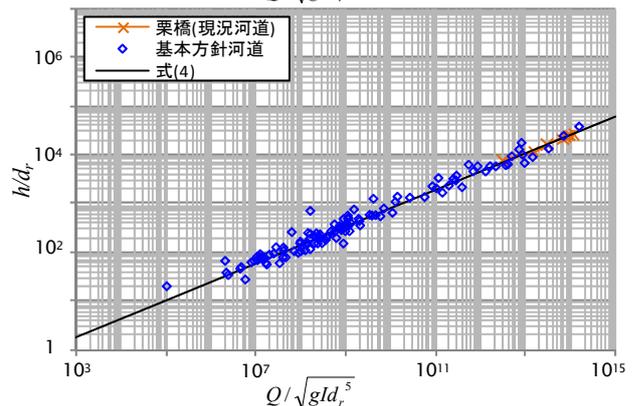
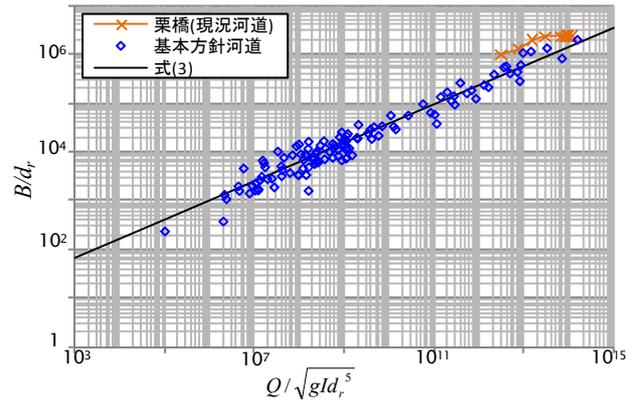


図-8 無次元量の時間変化(栗橋)

を対象に、無次元流量と無次元水面幅、無次元水深の関係を検討する。

(1) 対象地点・対象洪水の概要

対象は、利根川の基準地点である八斗島(181.5km)と主要地点の栗橋(130.5km)である。対象洪水は近年の洪水で最も大きな流量を観測した平成10年9月洪水を対象とする。図-5、図-6に八斗島と栗橋の平成10年洪水後の断面形状と洪水時の水位ハイドログラフを示す。八斗島、栗橋の断面はどちらも複断面河道であるが、八斗島の断面は水位が高水敷に達するまでの間に、低水路内で段階的に水面幅が広がる形状であるのに対し、栗橋の断面は低水路と高水敷で、ほぼ2つの水面幅しか取ることができない形状になっている。流量ハイドログラフ、水位ハイドログラフはいずれも実測値を用いている。

(2) 水位変化に伴う無次元量水面幅、無次元水深と無次元流量の関係

図-7、図-8に八斗島と栗橋での、平成10年洪水と河道について無次元流量と無次元水面幅、無次元水深の関係を示す。八斗島での無次元流量の増加に対する無次元水面幅の増加は、式(3)と同様の変化を示す。一方、栗橋では無次元流量の増加に対し、水位が高水敷のある高さに達するともはや水面幅が広がることができず、無次元水面幅が折れ曲がる。無次元流量と無次元水深の関係は、栗橋では水面幅が増加できない分、無次元水深の増加と平均流速の増加となっている。基本方針河道では、無次元流量と無次元水面幅、無次元水深の間には、式(3)、(4)で表わされる関係があるが、河道断面の形状が異なると、無次元流量と無次元水面幅、無次元水深の変化の過程に

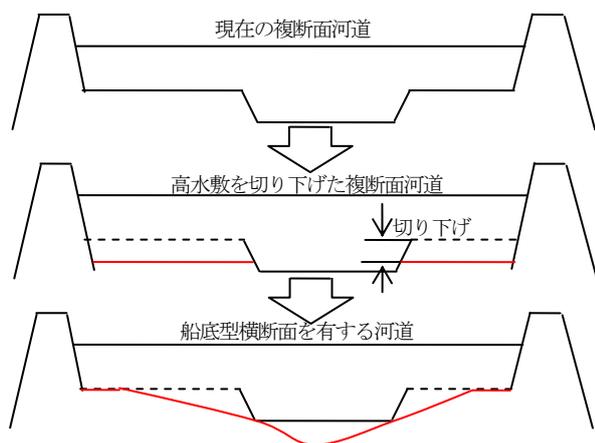


図-9 複断面河道の改修の一例

若干の違いが生じるがその差は小さく、この場合にも式(3),(4)が成立するといえる。

(3) 治水と環境の両面から望ましい河道横断面形は船底型断面か

我が国で一般に河道断面として用いられている複断面形は、河川環境の視点から考えた場合、環境の連続性を弱め、生物にとっても好ましくない状況をつくると言われている¹³⁾。また、近年、高水敷と低水路の比高差が大きくなり、治水上、環境上の課題が表れてきている。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と予想される。そのため、治水、環境の両面を考慮した断面形状が求められる。カナダやアメリカの自然河道に見られる図-4に示す船底型横断面形は、式(3),(4)をほぼ満足することから、我が国においても船底型断面形の河道について検討することは、意味があると考えられる。図-9には、治水と環境の改善を意識した複断面河道の段階的な改修の一例を示している。この段階改修は、今後の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。この断面形、特に河床形が洪水流に対して、安定であるかを検討する必要がある。一方で、低水路の水際を図に示すように連続的な形状にすることにより、高水敷への冠水頻度を上げ、河道内樹木の繁茂の進行を防ぎ、維持管理の改善を図るとともに、冠水頻度に応じた樹木の種の形成、また、陸域と水域を連続的に移動する生物にとっては好ましい環境の断面形を提供する可能性がある。河川利用の面については、大いに議論のあるところであるが、船底型断面形は、今後、多面的な検討に値する重要な課題であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、次元解析により求めた無次元量の関係に対し、河川データを用いて安定な河道断面を表現する式を導き、今後の川づくりの方向性を論じた。以下に主な

結論を述べる。

- 1) 次元解析より、断面形状（川幅、水深）は、流量、河床勾配、河床材料からなる無次元流量 $Q/\sqrt{gId_r^5}$ によって規定され、我が国の河川の基本方針河道に対して導いた無次元流量と無次元水面幅、無次元水深の関係式は、カナダ、アメリカの自然河川においても成立する。
- 2) 利根川現地断面における実績洪水についても、関係式が近似的に成立する。
- 3) 治水と環境の調和した川づくりのために、船底型横断面形についての検討の必要性を示した。

謝辞：国土交通省北毎道開発局、東北地方整備局、関東地方整備局、北海道地方整備局、中部地方整備局、近畿地方整備局、中国地方整備局、四国地方整備局、九州地方整備局の各河川部局には、貴重なデータを提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉川秀夫：改訂河川工学，朝倉書店，1966。
- 2) 池田駿介，Gary Parker，千代田祥明，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。
- 3) 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理，河川技術論文集，第13巻，pp.339-344，2007。
- 4) 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趾辺の砂州形状に伴う洗掘架の増大について，河川技術論文集，第15巻，pp.249-254，2009。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 須賀正志，前島達也，藤本昌利，長田健吾，福岡捷二：澱筋化・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。
- 8) 中小河川に関する河川計画の技術基準，国土交通省河川局，2008。
- 9) Bray, D.I. : Estimating average velocity in gravel-bed rivers, *J. Hydraulics Div. ASCE*, Vol. 105, HY9, pp. 1130-1122, 1979.
- 10) 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.
- 11) Nakato, T.: Test of selected sediment-transport formulas, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No3, pp. 362-379, 1989.
- 12) U. S. G. S.: Sacramento River Basin NAWQA Program, <http://ca.water.usgs.gov> (参照:2009/09/30)
- 13) Klingeman, P.C.: River engineering to restore and re-naturalize rivers, リバーフロント整備センター，1998。

(2009. 9. 30受付)