水工学論文集,第56巻,2012年2月

無次元流量に対する無次元河幅・水深のとる範囲と整備途上河川への適用

DESIRABLE RANGE OF DIMENSIONLESS WIDTH AND DEPTH VERSUS DIMENSIONLESS DISCHARGE AND APPLICATION TO RIVERS AT DESIGN AND IMPROVEMENT STAGES

福岡捷二[1]・坂口達哉[2]
Shoji FUKUOKA and Tatsuya SAKAGUCHI

[1]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）
[2]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）

It is an important issue to determine the river cross-section which is satisfied with functions of the flood control and the river environment. Fukuoka has derived the relationships of dimensionless width and depth versus dimensionless discharge considering floods and river basin characteristics.

The purpose of this study is to show the application method of Fukuoka's equation to rivers at design and improvement stages. At first, we determine desirable range which dimensionless width and depth versus dimensionless discharge holds for rivers with various cross-sections. Secondly, we suggest that river width and cross section at an improvement stage should be improved up to the safety level of 1/30.

Key Words : *dimensionless river width and dimensionless discharge, Fukuoka's equation, river at an improvement stage*

１．序論

福岡ら[1),2),3)]は，沖積地河川の治水と環境の調和を目指し，自然河川から学ぶ河道断面形状の研究を進めてきた．そこでは，沖積地河川の安定な断面形状は，流域の特性を代表する河道形成流量，河道勾配，河床材料等の物理量に規定されるとの考えのもとに，人の手が加わっていない明治時代の利根川やカナダの自然河川および河岸拡幅実験等異なるスケールの沖積流路に対して，無次元河幅，無次元水深が流域の特徴を表す無次元流量に規定されることを明らかにし，式(1)，式(2)に示す無次元河幅，無次元水深の式を導いている．

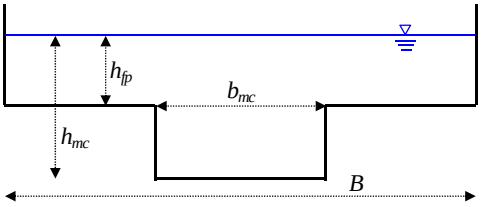
$$\frac{B}{d_r}=4.25\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.40} \quad (1) \qquad \frac{h}{d_r}=0.13\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.38} \quad (2)$$

ここに，Q：流量，B：河幅，h：水深，I：勾配，d_r：代表粒径(=d_{60})，g：重力加速度である．

河川の河幅については，低水路の河幅研究[4)]，河床の構造に起因する抵抗に着目した河幅の比較研究[5)]等がある．しかし，福岡の研究[3)]は，河幅，水深等について，治水と環境を一体的に論じて河道断面形を決定しようとするものであり，文献4)，5)の河幅議論とは論点を異にしている．すなわち，河岸拡幅を伴う河道形成流量時の河幅等の決定には，河床形態や流砂量等は二次的な要因であり，式(1)，式(2)を規定する物理量が，河幅，水深等を決めるとの考えに立脚している．

式(1)，式(2)は一級河川基本方針河道の基準地点においても，計画高水流量を河道形成流量として平均的に成立することが示されている．さらに，多自然川づくり計画において，治水と環境の調和した河道断面形状には，式(1)，式(2)の関係を用い検討するのが望ましいと主張している[3)]．しかし，基本方針河道のデータは，それらの平均曲線を示す式(1)，式(2)に対して，河道断面形状の違いに起因して系統的にずれが存在することが示されている[1)]．式(1)，式(2)からのずれ幅は，時には河道設計上無視し得ない場合がある．

本研究では，初めに，河道設計のために式(1)，式(2)からのずれ幅を明確にし，無次元流量に対する無次元河幅，無次元水深の取るべき範囲の式を求める．次に，整備途上河川へ福岡の式を適用し，河幅，水深等の検討方法を示す．最後に，福岡の式を中小河川に適用する意味を述べ，福岡の式に基づき現在の中小河川の川づくりの課題と改修の方向性を議論する．



h_{mc}：低水路平均水深　　h_{fp}：高水敷平均水深

b_{mc}：低水路幅　　B：計画高水流量流下時の水面幅

図-1　複断面河道の諸元

2．河道断面形状の違いを考慮した無次元流量に対する無次元河幅，無次元水深のとる範囲

河道断面形は多様であることから，無次元流量に対する無次元河幅，無次元水深について平均的に成立するひとつの式で表現するだけではなく，取り得る範囲も検討することが望ましい．式(1)，式(2)の検討に用いた基本方針河道の基準地点及び主要地点の河道断面は，形状だけから判断すると40地点が単断面河道，68地点が複断面河道に分類される．ただし，基準地点が岩河道で狭窄部となっている河道断面は特別であるので検討から除外されている．河道の平面，縦横断形状からみて，複断面形であっても相対水深の違いにより，単断面的な洪水流れの構造をとる場合がある[6]．基準地点及び主要地点の断面形状が複断面形である68地点について，計画高水流量が流下した時に複断面河道流れとなるか，形は複断面形状を有していても実質的に単断面的河道流れになるかを再検討する．図-1に示す断面諸元を用いて，基準地点及び主要地点の低水路幅と計画高水流量流下時の水面幅の比b_{mc}/B，高水敷平均水深と低水路平均水深の比h_{fp}/h_{mc}の2つの断面パラメータをそれぞれ横軸，縦軸にとり，図-2にプロットしている．図中には，複断面形状とその断面に計画高水流量が流下したときの模式図と該当する断面パラメータ位置を示している．図-2の青色で示した範囲にある河道すなわち，b_{mc}/Bが0.7以上，h_{fp}/h_{mc}が0.5以上となる複断面河道流れは，以下の理由で単断面河道流れに分類してよい．緩やかな蛇行線形を持つ低水路と広い高水敷からなる複断面河道では，相対水深 h_{fp}/h_{mc} が0.3以上になると，低水路と高水敷における流れの間の混合により，低水路内岸寄りの流速が早い複断面的流れが出現するが，一般に，十分高水敷水深が高くなると，洪水流れは，堤防の線形に規定され，低水路中央が流速最大となる単断面流れの特性を持つことが知られている．特に，高水敷幅が狭いb_{mc}/Bがほぼ0.7以上に達すると，計画高水位に達するような大流量では，単断面的な流れになる．このときには，h_{fp}/h_{mc}が0.5以上となり，複断面河道流れは単断面的流れの構造を持つようになる．この判定基準によると，計画高水流量流下時には，複断面形状の68地点の内，32地点は単断面河道流れに分類され，最終的に，基本方針河道の基準地点及び主要地点は，72地点の単断面河道，36地点の複断面河道に分類できる．

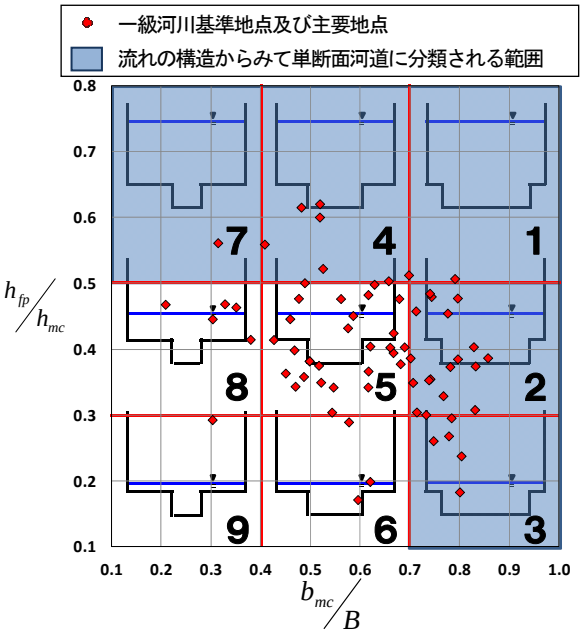


図-2　一級河川基準地点及び主要地点の複断面河道の特徴

このように，分類し直した基本方針河道の基準地点及び主要地点の無次元計画高水流量と無次元河幅，無次元水深の関係を図-3，図-4に示す．図-3に示す無次元河幅は，式(1)に対して複断面河道が上側に，単断面河道は下側に分布する．一方，図-4に示す無次元水深は，式(2)に対して複断面河道が下側に，単断面河道が上側に分布する．図-3，4に示すように，断面形状を考慮することによって，単断面，複断面それぞれの形状について，無次元流量に対する無次元河幅，無次元水深でプロットされたデータの中心線からのずれは小さくなる．図より，複断面河道，単断面河道の無次元流量に対する無次元河幅，無次元水深の関係は，式(3)，(4)および式(5)，(6)で表すことが出来る．

$$\frac{B}{d_r} = 6.33\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.40} \quad (3) \qquad \frac{B}{d_r} = 2.80\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.40} \quad (5)$$

$$\frac{h}{d_r} = 0.14\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.38} \quad (4) \qquad \frac{h}{d_r} = 0.10\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.38} \quad (6)$$

河川は種々の断面形をとることから，平均的な無次元河幅，無次元水深だけでなく，断面形が取り得る範囲，すなわち，式(1)，式(2)を平均曲線として，河川の望ましい無次元河幅は式(3)を上限，式(5)を下限とし，無次元水深は式(4)を上限，式(6)を下限としたそれぞれの式，式(7)，式(8)を範囲とするように決める．

$$2.80\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.40} \le \frac{B}{d_r} \le 6.33\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.40} \quad (7)$$

$$0.10\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.38} \le \frac{h}{d_r} \le 0.14\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}\right)^{0.38} \quad (8)$$

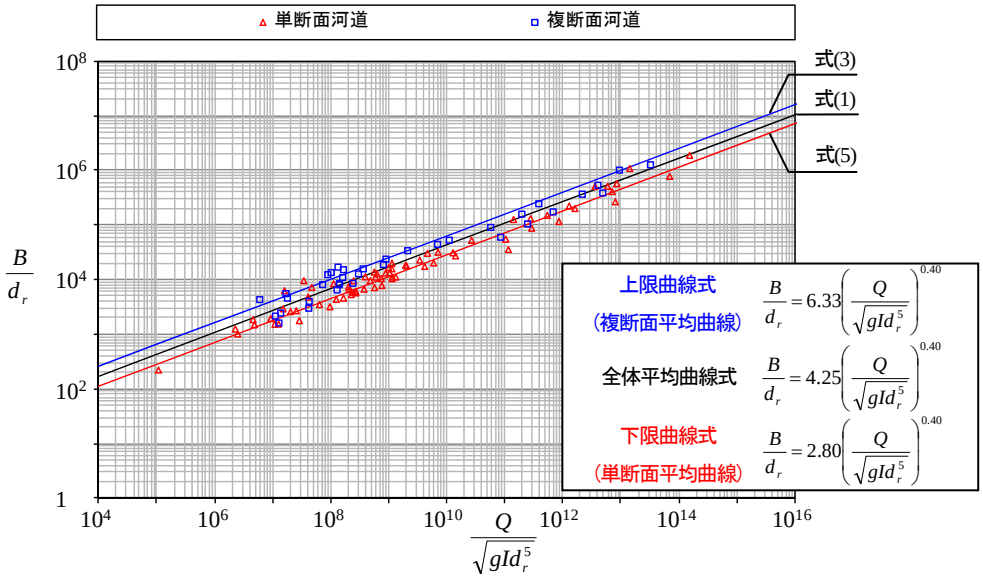


図-3　一級河川基準地点の無次元計画高水流量と無次元河幅の関係

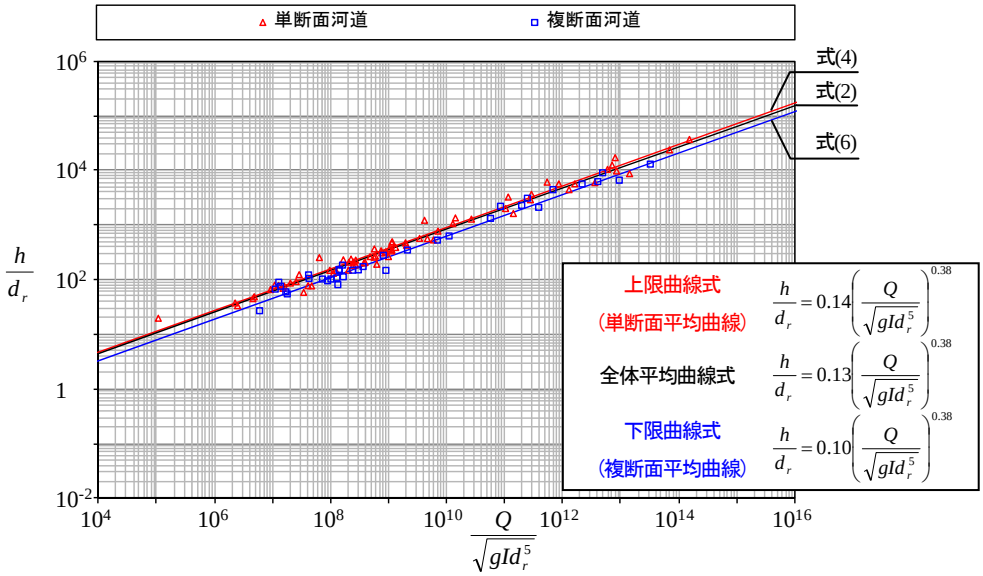


図-4　一級河川基準地点の無次元計画高水流量と無次元水深の関係

３．整備途上河川の河道形成流量と福岡の式の適用

日本の河川の多くは，整備途上の段階にあり，堤間幅は整備基本方針河道レベルで概成していても，縦横断面形は完成していない．**図-5**に整備途上段階の河道横断図および平面図の模式図を示す．今日，改修過程にある河川では，整備計画河道が検討対象になる．現況河道断面に対しては，整備計画流量が流れると，これを河道形成流量として低水路河岸，河床等が浸食され，それに応じた河道断面形が形成されると考えられる．一般的には，流下能力が小さい河道では，流下能力以上の流量が流れると，それを河道形成流量とするような断面形に変化しようとする．河川技術者は，このことを暗々裏に考慮して，整備計画流量を安全に流すために計画的に河道掘削や引堤等を行っているが，事前に改修の河幅や水深を算出でき合理的に河道断面を決めることが出来る．

式(1)，式(2)が多様な河道と洪水の広い条件で成立することは，平野[7]，福岡ら[8]による移動床実験水路を用いて行った異なる河道形成流量での断面拡幅実験結果，及び福岡らによる常願寺川高水敷上に掘削した大規模流路において行った異なる河道形成流量での断面拡幅実験結果からも明らかにされている[3]．このことは，改修に当っても無次元河道形成流量を決めて，式(1)，式(2)で無次元河幅，無次元水深を検討することが可能である．

図-6は，多摩川および利根川の現況河道断面に実際に起こった洪水流の主要地点での実測の水位と流量ハイドログラフを用いて，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．対象洪水は，多摩川平成19年9月洪水（石原地点，流量確率規模1/18）と利根川平成10年9月および平成19年9月洪水（八斗島地点でそれぞれの流量確率規模は1/22と1/14）である．複

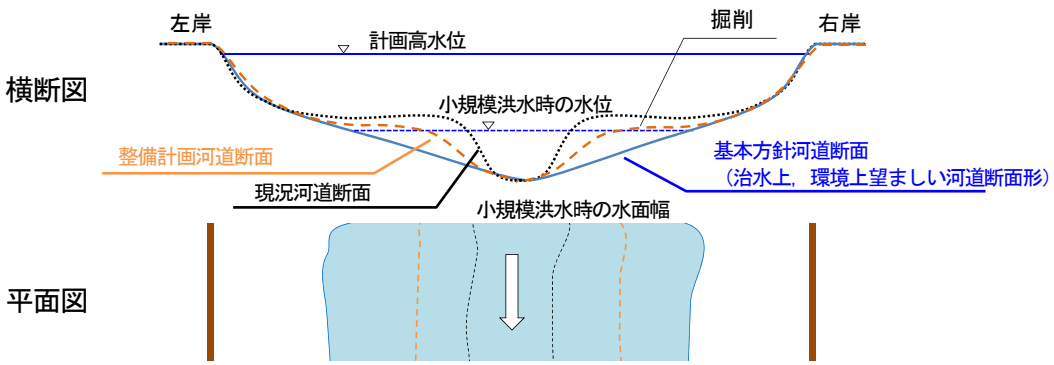


図-5　整備途上段階の河道横断図および平面図の模式図

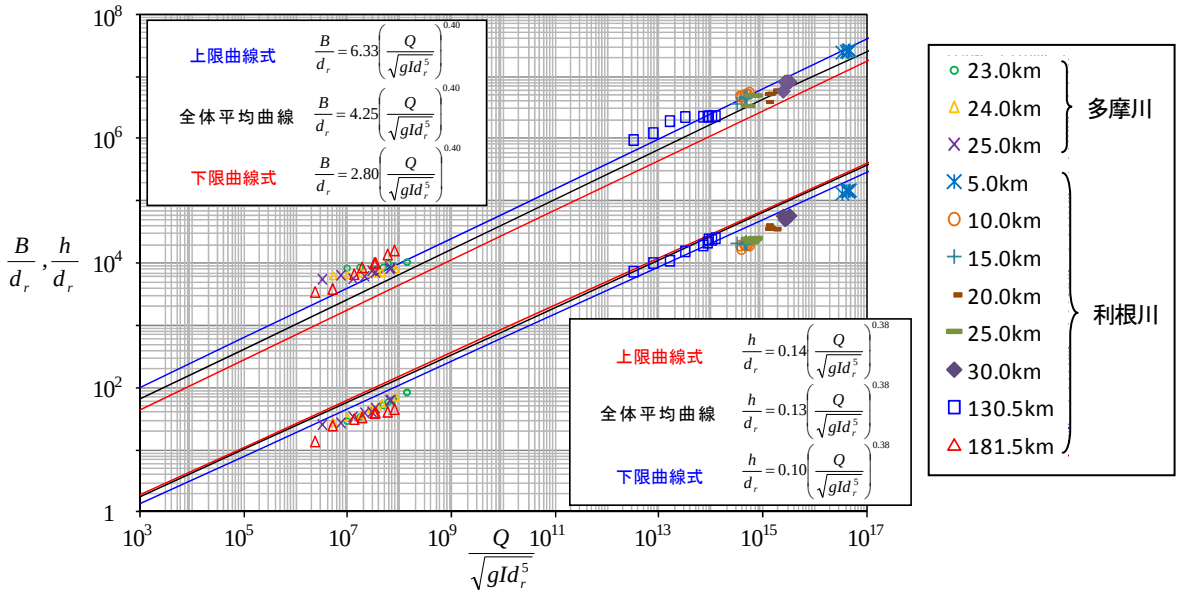


図-6　現況断面における実績洪水時の無次元量の関係

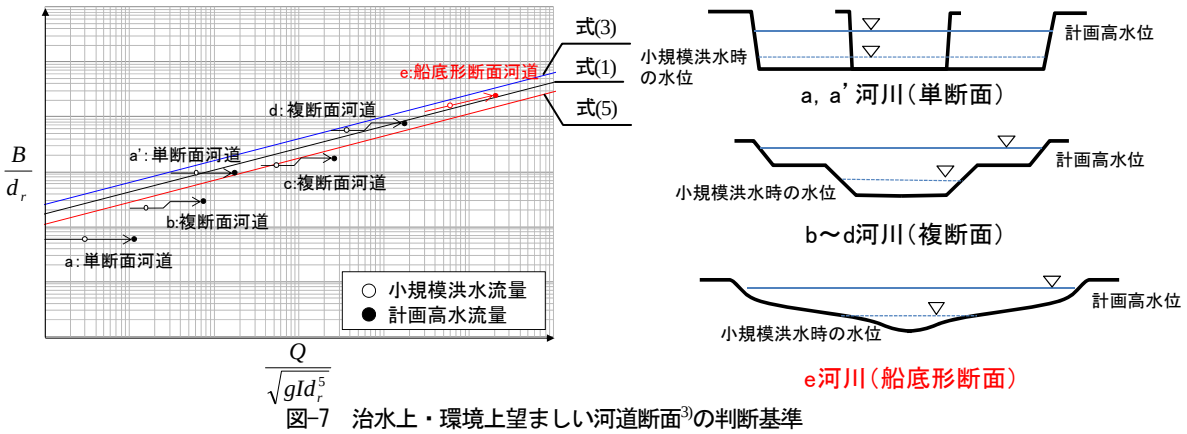


図-7　治水上・環境上望ましい河道断面[3)]の判断基準

断面河道である多摩川と利根川では，高水敷高より水位が高い流量になると，水面は堤防に達し，さらに流量が増加し最終的に計画高水流量に達しても，水面幅はそれほど大きくは変われない．多摩川，利根川の基準地点の河幅は，計画の河幅となっていることから，観測された洪水のそれぞれの時間で無次元流量に対し，無次元水面幅は福岡の式より大きくなり，無次元水深は小さくなる．**図-6**に示すように，現況河道や改修河道について，発生した洪水ハイドログラフに対する無次元流量の変化に対して，無次元水面幅，無次元水深の変化のパターンから対象河川の整備状況を知ることが出来る．

次に，異なる改修レベルの河川への適用とその解釈を示す．単断面，複断面，船底形を有する河道の無次元流量の変化に対する無次元水面幅の変化を模式的に**図-7**に示す．単断面の*a'* 河川，複断面の*d* 河川，船底形の*e* 河川は，現況河道においても計画流量を流下させることが可能で，*a'* 河川を除いて，船底形の自然河道に近い断面を有する河川である．*c*河川は断面改修を行うことによって，計画高水流量が流れることが可能になるレベルの計画安全度を有する河川である．一方，*a*河川，*b*河川は，無次元河幅が式(1)，式(7)よりもかなり小さい計画の安全度を有する河川である．望ましい河道断面への改

表-1　対象河川の概要

河川名	対象断面位置	主な周辺土地利用状況	計画高水流量 Q〔m^3/s〕	河幅 B〔m〕	水深 h〔m〕	代表粒径 d_r〔mm〕	計画河床勾配 I	計画の安全度	流域面積〔km^2〕
都幾川	埼玉県東松山市上唐子1730地先（月田橋付近）	農用地，森林	1100	136.0	3.9	86	1/500	1/50	153.5
五行川	栃木県真岡市荒町3丁目地先（御橋付近）	住宅用地	290	43.3	2.5	75	1/460	1/30	279
永野川	栃木県栃木市鍋山町92地先（藤沢橋付近）	農用地	350	41.5	2.3	75	1/160	1/30	172
粕川No.1	群馬県伊勢崎市本関町1252地先（一之堰付近）	農用地	635	44.8	2.9	117	1/150	1/30	93.3
粕川No.2	群馬県伊勢崎市赤堀今井町1丁目地先（飯玉橋付近）	農用地	535	45.9	2.7	118	1/150	1/30	93.3
和泉川No.1	神奈川県横浜市泉区和泉町945地先（鍋屋橋付近）	住宅用地，農用地	60	14.6	1.6	53	1/300	1/10	11.5
和泉川No.2	神奈川県横浜市泉区和泉町5096地先（宮下新橋付近）	住宅用地	60	11.1	1.6	20	1/300	1/10	11.5
和泉川No.3	神奈川県横浜市泉区和泉町7542地先（宮沢橋付近）	住宅用地	50	12.9	1.6	18	1/300	1/10	11.5
越辺川	埼玉県越生町黒岩5地先（春日橋付近）	住宅用地，農用地	340	42.7	2.5	330	1/250	1/5	65.2
谷地川	東京都八王子市丹木町2丁目地先（黄金橋付近）	住宅用地	100	15.4	2.2	35	1/150	1/3	18.2
小畔川	埼玉県日高市高萩1753地先（小畔川橋付近）	住宅用地	80	21.0	1.3	59	1/160	1/3	37.8
不老川	埼玉県川越市今福563地先（今福歩道橋付近）	住宅用地	80	11.6	1.9	53	1/160	1/3	56.6
いたち川	神奈川県横浜市栄区笠間4丁目地先（いたち川橋付近）	住宅用地	90	17.8	2.4	12	1/800	1/2.5	13.9

修は，流量が増大しても，福岡の式(1)に沿って水面幅が変化し，上限曲線式(3)と下限曲線式(5)の間に入る式(7)の関係式となるような水面幅の設計がされることである．

４．中小河川における無次元計画高水流量に対する無次元河幅，無次元水深の関係と整備の方向性

中小河川における多自然川づくりでは，流下能力向上に必要な河積の確保には，河幅拡幅を優先して検討することを原則としている[9)]．用地や財政面の制約により拡幅が困難な場合も多いが，そのような場合においても，河床を掘り下げる方法ではなく，河床幅を広くとることが望ましいとされている．しかし，抱える問題は中小河川ごとに異なるため，どのような河幅にすべきか具体的な技術基準は示されていない．中小河川の河幅等の技術議論を深めていくためには，まずは異なる特性の河川流域や計画の安全度を有する河川の洪水流と断面特性の現状理解から始める必要がある．

2節で述べた式(7)，式(8)の関係を，両岸護岸で固められた市街地を流れる河川，土地利用状況が異なる都市と地方の河川等，自然的，社会的条件の多様に異なる中小河川に適用することに問題なしとはしないが，今日の中小河川の改修レベルを式(7)，式(8)を用いて，比較検討し，そこから今後の改修のあるべき姿を議論することは十分意味のあることである．検討には，**表-1**に示す国土交通省河川環境課および（財）リバーフロント整備センターが収集した，平成18年度事業中の対象とした関東地方の中小の10河川13地点の計画河道諸元を用いた．対象河川は計画の安全度1/2.5～1/50までの様々な規模と特性を有し，周辺の土地利用状況も，住宅用地から農用地まで様々である．検討に用いる諸元は，当該地点の計画高水流量Q，計画高水流量流下時の水面幅Bである．水深hは断面平均水深，勾配Iには計画河床勾配を用いた．これらの資料には，河床材料データは含まれていなかったことから，現地調査を行い，データを収集した．調査した項目は河床材料，河道縦横断面形状である．河床材料採取地点は澪筋部とし，粒径加積曲線の算出には，ふるい分け試験による通過質量百分率から粒径加積曲線を算出した．ただし，河床材料が大きい河川では，線格子法による個数百分率から粒径加積曲線を求めた．河床材料の代表粒径にはd_{60}を用いた．

図-8に検討対象河川の無次元計画高水流量と無次元河幅，無次元水深の関係を示す．この図より，計画の安全度1/50である埼玉県の都幾川は，対象断面のすぐ下流が，荒川の直轄区間であるため，安全度が高い河道となっている．他の対象河川は，沖積地河川の無次元河幅に比べて狭く，無次元水深は大きい．この理由は，中小河川の河道の作られてきた経緯が，式(1)，式(2)が成立する自然河川や基本方針河道とは異なるためである．自然河川においては，河道形成流量や勾配，河床材料に見合った断面形状になるよう，自然の外力によって自ら河幅を拡げようとする．また，度重なる洪水による災害を経験し，そのたび毎に被災流量を流せるよう，引堤等の河道拡幅や築堤が行われ河道断面形状が決められてきた．その結果，基準断面では基本方針河道の断面形が概ね出来上がっている．しかし，中小河川は，その多くは河道形成流量によって形成された断面形状ではなく，用地や財政面の制約等，地域の事情から決められてきた面が大きい．河幅は容易に拡げることが出来ず，むしろ現在の河川敷内で河床を掘り下げ，水深を大きくする整備がなされてきた．

計画の安全度に着目すると，**図-8**の赤枠で示す計画の安全度1/2.5～1/10の河川の無次元河幅が最も狭く，無次元水深は式(8)が示す無次元水深より大きくなっている．このような河川は，用地の制約が大きく河幅が拡げられない都市域を流れる河川に多く，河岸に護岸をすることによって，流量が流れることを期待しているが，流速が大きくなり，河床の洗掘等による護岸の崩壊等の危険と隣り合せにいることになる．また，1/2.5～1/10の計画規模は，これを超える洪水は容易に起こり得ることを考え

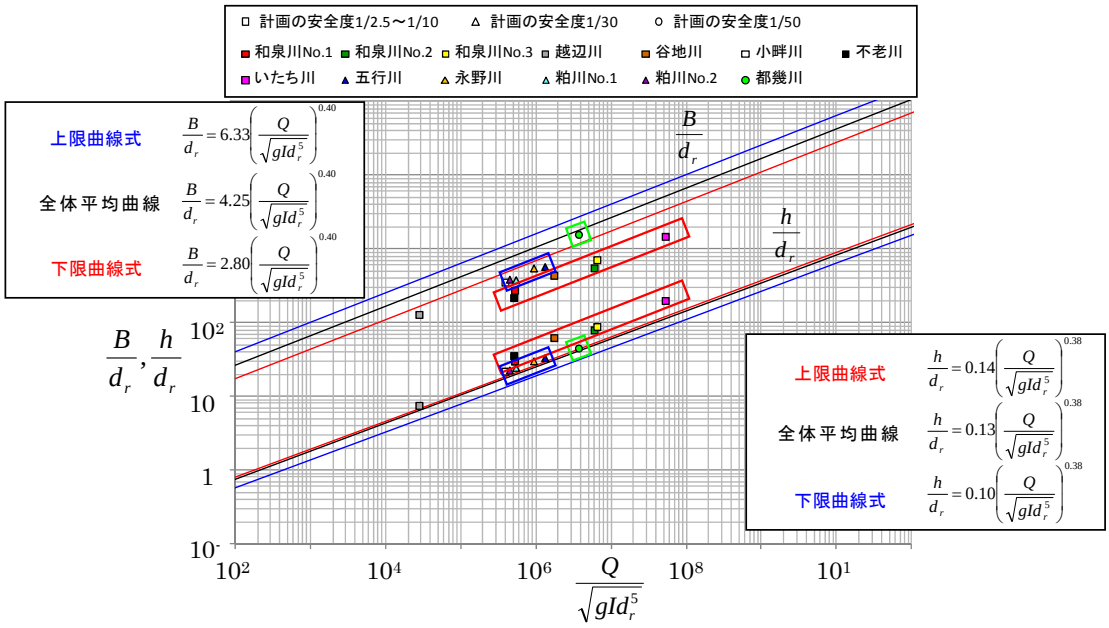


図-8　中小河川の無次元計画高水流量と無次元河幅，無次元水深の関係

ておかなければならない．次に，**図-8**の青枠内に示すような，計画の安全度1/30の河川では，無次元河幅が下限曲線式に近付いており，少しの河幅拡幅等が相当の安全性向上につながることがわかる．

以上，中小河川の河幅，水深等について沖積地河川について導かれた福岡の式をベースに論じたが，この検討手段は，確かな整備手法を持たない中小河川に対して技術判断する上での意義を持つと考えている．計画の安全度が低い河川を，河幅拡幅等の改修により，式(7)，式(8)の関係を満足するような河道にすることは，用地や財政の制約の厳しい状況にある中小河川にあっては容易でない．しかし，**図-8**に示すように，計画の安全度1/30の河道の無次元河幅は自然河川で成立する無次元河幅の下限曲線式に近付いており，中小河川は，その有する自然的，社会的特性は河川ごとに大きく異なり，治水安全度を一律に論ずることは難しいが，少なくとも，大都市地域を流れる中小河川にあっては，計画の安全度1/30程度の河道断面形状を目標に整備を進めることが検討されるべきである．そのために，街づくりと川づくりの一体的検討による川の整備と川を生かした街づくりに向けて，河川関係者と街づくり関係者は協力し積極的に関わっていくことが必要である．

５．結論

本研究の主要な結論を示す．

1) 河川の無次元流量に対する無次元河幅と無次元水深のとる範囲を導き，治水と環境のバランスした河川の断面形は，概ねその範囲に収まるのが望ましい．
2) 整備計画途上の河川に対しても，対象とする流量を設定し，それを河道形成流量とするように式(7)，式(8)で河幅，断面形状を決定するのが望ましい．
3) 中小河川について，無次元流量に対する無次元河幅，無次元水深の検討から，計画の安全度が1/30程度を可能にする断面形を目標にするのが望ましいこと，そのための整備に必要な方向性を示した．

謝辞：本研究は，科学研究費補助金(基盤研究(A)，課題番号22246067，研究代表 福岡捷二)の助成を受け行われた．国土交通省河川環境課および財団法人リバーフロント整備センターから資料の提供を受けた．東京都，横浜市，埼玉県，栃木県，群馬県から河川現地調査の協力をいただいた．記して謝意を表する．

参考文献

1) 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.
2) 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.
3) 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.
4) 山本晃一：構造沖積河川学，山海堂，2005.
5) 井上和則：沖積地の安定な河幅に関する既往研究の総説の試み，河川技術論文集17，pp. 113-118，2011.
6) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005.
7) 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.
8) 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，土木学会論文報告集，第351号//Ⅱ-2，pp. 87-96，1984.
9) 中小河川に関する河道計画の技術基準について，国土交通省河川局，2008.

(2011. 9. 30受付)