

# 超過洪水時の三次元エネルギー分布に基づく 河道・堤防の一体設計の考え方

## INTEGRATED DESIGN OF LEVEE AND RIVER CHANNEL BASED ON THREE DIMENSIONAL ENERGY DISTRIBUTIONS OF EXCESS FLOODS

福岡 捷二<sup>1</sup>  
Shoji FUKUOKA

<sup>1</sup>フェロー 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

近年の大規模洪水の発生に伴う観測、解析技術の進展によって、新しい水理現象の出現や治水施設被害が認識され、これらに対応出来る非静水圧分布を考慮した準三次元運動方程式に基づく水理現象の解明と河道設計技術への適用が重要であることが認識されてきた。

本研究では、これまで行われてきた観測水面形に合致するように解析から準三次元運動方程式によって求めた三次元流速分布や圧力分布、水位分布の時空間的な値を洪水流のエネルギー方程式に導入することで、河道内の洪水流の三次元エネルギー分布を求め、その持つ意味について議論を行っている。この三次元エネルギー分布及びその勾配は、超過洪水を安全に流す堤防や河道断面形等河道設計のための重要な外力を与えることを示し、せんだん力など局所的外力に基づく従来の河道設計法には限界があることを述べている。三次元エネルギー解析法は、洪水流の作用するすべての外力項を考慮した解析法であり、これを用いた堤防と河道の一体的設計法の重要性とそれを用いた設計の一つの考え方を提示している。

**Key Words :** excess flood, levee, channel, three dimensional energy distribution

### 1. はじめに

今日高い雨量強度で長時間にわたる豪雨によって、河川水位がHWLを超えたり、堤防天端に達したりするような異常な洪水が全国の河川流域で起こっている。このような大洪水のHWLの水位前後で、これまでの河川の計画、管理では考えられて来なかった河道の水理現象が見られた。この水理現象は、洪水流量の大きさ、低水路と高水敷の平面配置や大きさ等河道の平面形、縦断形との関係で生じており、超過洪水位に密接に関係することから治水計画に重要であり、高精度な準三次元解析技術<sup>1)</sup>を用いた新たな河道計画、設計技術が求められている<sup>2)</sup>。この計画、技術は低水路と高水敷の配置と密接に関係し治水のみならず河川環境、河川利用面からも新しい川づくりに結び付く機会となり得る。

本論文は、最初に計画規模の洪水、施設の規模を超える超過洪水に対して、洪水防御計画はどのようにあるべきか特に堤防と河道の作り方について論じ、次に洪水流の三次元エネルギー分布の解析法を提示し、これを用いた堤防と河道の一体的設計法とその持つ意味を述べ提言している。

### 2. 河川技術の抱えている問題

明治以降のわが国の河川技術は、洪水災害に対応して河道改修を進めながら治水の安全度を徐々に高めてきた。国管理河川では、災害が起こると河道断面を大きくし、ダム等洪水防御施設をつくり、種々の規模で起こる洪水流量を河道で流し得るように改修が行われてきた。既往最大流量主義から雨のデータの蓄積、整備とともに降雨確率で計画高水流量が算定されるようになり、これによって河川改修が計画的、継続的に行われてきた。

当初の洪水流解析は定常で等流、または不等流として行われていた。この考え方は単純化した考え方とはいえ、洪水流の水面形は、時間的に河床にほぼ平行であり、また、大きな集水域では、豪雨に伴う大河川の洪水流の流量、水位は、ピーク時にはほぼ一定値を取ることから、ピーク時の水位を検討するには準定常・等流を仮定しても工学的に問題ないと考えて来た。やがて、複断面河道や樹木が繁茂している河道流れが扱われるようになり横断方向の混合を考えた準二次元不等流計算が河道計画に用いられるようになった。計算技術の進歩とともに、洪水解析に平面二次元解析が使われるようになり、洪水現象に対して非定常平面二次元解析は有効であることが示されてきた。

洪水流量を安全に流すための河道と堤防は河川の重要な施設で一体的に計画され、設計されるべきものである。しかしながら、堤防は、古くは地域を守る輪中堤や不連続堤などの地先を守る施設として作られて来た経緯があり、一方、河道は、自然的、社会的、財政的な制約

の中で改修が進められてきた。堤防が連続堤方式に変わっても、河川改修には膨大な時間がかかるために、堤防と河道ともに段階的に能力拡大が行われてきた。このような経緯のゆえに、両者が一体的、有機的技術として改修が行われているとは言い難い。国が管理している河道の流下能力が上がってきた今日、堤防の設計は河道の流れの機構を十分取り入れ、河道設計は計画規模の洪水が流れるときの堤防の構造、強度を十分考えることにより両者を一体とする設計法に変えていくことが強く望まれる。

近年、全国各地で起こっている豪雨による甚大な河川災害の発生は、河川技術への大きな警鐘と新しい技術の必要性を求めている。これまでの河川技術は、簡単で分かり易いものが良いという経験主義が根底にあり、技術の科学化が著しく遅れている。分かり易い技術は必要である。しかし、それだけでは社会の要請に応えることが出来なくなってきたことを認識し、技術的備えをしなければ水災害の危機を乗り越えることは困難になる。

**BIMCIM**、都市の三次元プラットフォーム等土木工学分野では、三次元的解析技術は当然のように使われている。しかし、河川の洪水流については一次元、二次元解析技術で問題を解決しようとしている。もちろん、一次元、二次元的技術は河川事業に有効な場合が多いが、特に氾濫が予想される超過洪水では一次元解析、二次元解析では解決出来ない水理現象への対応が求められ、堤防と河道の一体的計画、設計、管理を行うための洪水流の三次元的解析技術の適用が必要とされている。

### 3. 洪水流の三次元エネルギー分布に基づく河道・堤防の一体的設計の必要性

河川管理施設等構造令の中で、河川堤防は、計画高水位以下の条件で、「流水の通常的作用」の下では、堤防の機能を発揮できなければならないとしている。河川管理施設等構造令の解説<sup>9)</sup>においては、洪水中には、河床の土砂が移動し、河岸侵食が発生し水衝部が移動する等して堤防侵食の危険性が生ずるなど堤防の安全性を確保できない状況が生じる蓋然性が高く、計画高水位以下であっても堤防は安全でないとして記述されている。洪水流に対する解析技術や観測が進んできた中で、河川堤防に対するこの説明はあまりにも抽象的である。「流水の通常的作用」に該当しない水理現象はどのような河道の条件下で生じ、どのような水理現象かをしっかり検討し、そのうえで堤防と河道の計画・設計技術はどうあるべきかを論じることが必要である。これまでの堤防と河道の整備は、歴史的、自然的、社会・経済的な条件から、必ずしも両者が一体的に進められて来なかったこと、洪水流と河道と堤防相互の力学関係を河道システムの中で一体

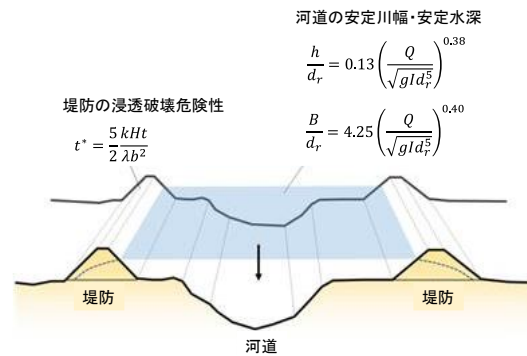


図-1 堤防と河道の一体的設計の考え方

的に検討する姿勢が欠けていること、堤防が概成し、河道が計画断面にほぼ近い断面形に整備されてきたこと、さらには気候変動条件下の洪水外力の増大を考慮すると、河道と堤防を一体として科学的、工学的に検討することが求められる。福岡<sup>9)</sup>は、2020年に図-1に示すように、堤防の侵食破壊や越流破壊に対しては、福岡の式に基づく河積の確保を考慮し、浸透破壊に対しては、洪水の継続時間を含む河道の洪水特性を考慮した堤防脆弱性指標を用いて評価し侵食、越流、浸透破壊の危険性の小さい堤防と河道の一体的設計法を提示し、その考え方と必要性を論じ続けて来た。治水施設としての堤防と河道の重要性を考えると、スピード感を持って一体的検討を進め技術的信頼性を高めなければならない。現在、堤防と河道の計画、設計、管理は、計画高水流量と計画高水位(HWL)の縦断面形を基準に判断しているが、洪水位・流量の増大、洪水頻度の増加に対してこれが適切な技術指標であるかの検証が必要である。

#### (1) 洪水流のエネルギー分布と複断面河道の断面形—自然河道に学ぶ

自然河道は緩やかで滑らかな断面形を持つ摩擦抵抗の小さい船底形河道が一般的で、これは、潤い摩擦を小さくし、エネルギーロスの小さい自然の理にかなった河道形状<sup>9)</sup>で、扇状地河道はその代表例である。

最初に船底形河道の形成機構について多摩川の改修を事例<sup>10)</sup>に述べる。多摩川を含め一般に自然の沖積地河道は、砂州が卓越する広い平坦な河道である。河川流域では人間活動が活発であり、河川の流下能力向上と河川利用のための河川改修が精力的に行われたこと、上流域からの土砂移動量の減少によって低水路河床が低下したこと、その結果もともと存在した砂州を高水敷河床とする二極化した複断面河道が見られるようになった。このような中で長期的な安定河床を目指した河川改修や河川構造物の設置により低水路河床が安定化に向かい、砂州からなる不安定で高低差のある河床、河岸部分は洪水流によって削られ低水路が広がり、その結果低水路と高水敷河床が滑らかな形状で接続する船底形河道に変化して来た。船底形河道は、高水敷と低水路が明確に分かれた複断面河道に比して、両者の河床面の高さの差はあるもの

の滑らかにつながる水理的、環境的に望ましい断面形状であると言える。複断面河道を洪水が流れると高水敷と低水路を流れる流量分担に応じて洪水流のエネルギー分布と水面高が決まる。低水路内を流れる洪水のエネルギーが過大であれば、低水路幅が広がるか河床が低下し、問題がなければ、与えられた流量と河道断面形の抵抗の中で水面高が決まる。流量が増大して来ると、低水路の洪水のエネルギーは高水敷の洪水のエネルギーに比して十分大きくなる。低水路がそのエネルギーを持ちこたえることが可能な断面形であれば、その断面形を維持する。しかし、耐えられなければ洗掘により断面形は変形する。複断面河道の洪水流量と洪水のエネルギーを通過させるに必要な物理量は、河道の全幅と平均水深であり、それに対して低水路幅は、洪水のエネルギーの大きさに応じて変化する物理量である。福岡<sup>67)</sup>は、河川流域の無次元支配流量に対する河道の無次元川幅と無次元平均水深の関係式を示したが、決まった堤間幅の河道を流れる洪水にあっては、低水路の断面形（幅と水深）は、洪水エネルギー分布の変化に対応して変化が必要である。低水路が粘着性材料で洗掘が起こりにくい複断面河道にあっては、低水路河道が断面形を維持できる洪水のエネルギーが高くなる。

複断面河道の低水路が蛇行していれば、洪水流の高水敷水深に対する低水路水深の比で定義される相対水深が低いうち(0.3以下)は遠心力による第一種二次流が卓越する外岸寄りの河床や河岸が侵食される流れとなる<sup>11)</sup>。一方、相対水深が高くなると遠心力による二次流と逆向きに回転する二次流により内岸寄りの流速が増大し、エネルギー分布も変化し、内岸寄りの河床や高水敷の洗掘が生ずる<sup>3)4)11)</sup>。このように、洪水エネルギー分布は、河道の断面形状と縦横断面水面形分布を規定し、これはまた堤防の線形や構造を規定することから河道と堤防は洪水エネルギーを介して一体的に設計されるべきものである。

## (2) 洪水流の三次元エネルギー方程式の河道設計への適用を考える

図-2は、一次元的に見た流れの水面形とエネルギー水頭の縦断形の関係を示している。図に示すように、洪水流には、私たちが見ている水面の上に運動のエネルギーを水頭換算した速度水頭が乗った全エネルギー水頭の面があり、洪水流は、重力の作用下で全エネルギー水頭の勾配で流れている。複雑な河道平面形、河床形状を持つ河川の大洪水時には、時間・空間的に著しく変化する三次元流れとなり、エネルギー分布の違いが水面の変動や水面高さの変化になって表れる。このような洪水流にあっては、河道設計にあたって水位だけでなく洪水の持つ三次元エネルギー水頭分布を考える必要がある。

次に、洪水流の持つエネルギーの大きさについて考察する。流速の3成分を $u, v, w$ とすると河道でのエネル

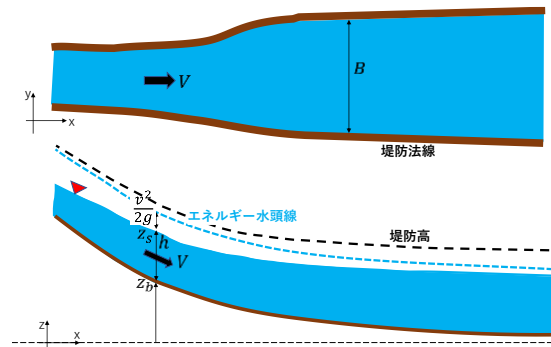


図-2 洪水流の断面平均された水位・エネルギー水頭の縦断分布

ギー水頭 $H_0$ は、位置水頭 $z$ と圧力水頭 $p/\rho g$ と速度水頭 $(u^2 + v^2 + w^2)/2g$ の和となり、式(1)で表現される。

$$H_0 = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{(u^2 + v^2 + w^2)}{2g} \quad (1)$$

エネルギー水頭は、その時間、場所でのエネルギーの高さを示しており、式(1)のエネルギー水頭の流れ方向の勾配で洪水は流れる。

複雑な形状を有する河道の洪水流は三次元的な流れとなり、このとき式(1)の $p$ は、もはや静水圧分布とはならず非静水圧分布となる。三次元的なエネルギー式(1)に各位置の流速を乗じ、さらにこれらを流水断面積 $A$ 内で断面平均とると一次元的なエネルギーフラックス $E_0$ を得る。

$$E_0 = \frac{1}{Q} \int_A \left\{ z + \frac{p}{\rho g} + \frac{(u^2 + v^2 + w^2)}{2g} \right\} u \, dA \quad (2)$$

これまで洪水流の速度水頭 $(u^2 + v^2 + w^2)/2g$ の大きさ及びその縦断変化が小さいものとして、式(1)のエネルギー水頭変化に代えて、水位 $H$ の縦断変化に基づき洪水流の解析が行われてきた。すなわち、現在の洪水流解析法は、実測縦断水面形の時間変化が、解析水位の縦断形の時間変化と合致するように洪水流の連続方程式と運動方程式を解くことにより、対象とする洪水流の流速分布、圧力分布等時空間的な流れ場を得ることが出来る<sup>12)11)12)13)</sup>。これにより洪水流の水利現象の理解が進み、河川の洪水流の種々の問題が解決されてきた<sup>3)4)10)11)</sup>。

しかし、洪水流量が大きく、また縦・横断面形の変化が激しい河道区間では、洪水流の速度水頭及びその変化が大きくなり、エネルギー水頭の変化が重要になる。図-3は、エネルギー水頭の変化が大きい本支川合流部における、水位、エネルギー水頭の三次元分布の関係を模式的に示したもので、HWL付近で流下する洪水流の流速は大きく、HWLよりも高い位置にエネルギー水頭面がある。流れの構造によっては、運動エネルギー水頭や圧力水頭は大きく堤防からの越水や堤防侵食による損傷、破壊が懸念される。



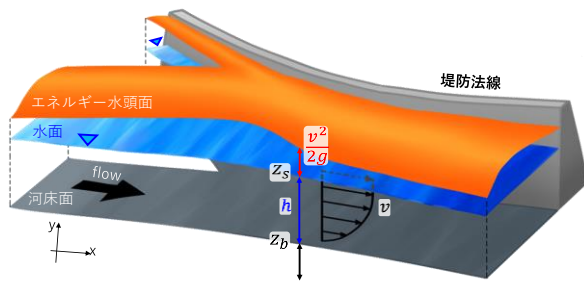


図3 本川と支川の合流点付近の三次元的なエネルギー水頭分布, 水位分布

図4 は二次元刃型堰を超える越流水についてエネルギー水頭面と刃型堰に作用する圧力分布の関係<sup>14),15)</sup>を示したもので、堰に作用する圧力分布は堰の越流水深に速度水頭を足した高さから決まる圧力であることを示している。このことは大洪水時に河川構造物に作用する力は、直上の水面の高さではなく、水面上のエネルギー水頭面の高さであることを示している。例えば、洪水流の流速が 5m/s の時の速度水頭は約 1.25m で、その高さは、ほぼ堤防の余裕高分に相当する。高いエネルギー水頭を有する激しく流れる洪水流は、越流破堤や侵食破堤の危険性を高くする。

洪水流による破堤は、越流、洗掘、浸透が原因で起こるが、現在の技術でこれらの破堤原因を解明するには不十分である。このため現在は、洪水流が HWL を超えると堤防は破壊するとして HWL 以下の水位で安全となる堤防の計画、設計、管理が行われている。現行の堤防の高さは、対象とする河道の HWL に計画高水流量に関係する高さ分（余裕高）を加えたものである。HWL を超える洪水の発生頻度が高まる中で、堤防の高さの決め方により科学的な検討が必要であると思う。

堤防等河川構造物の侵食や越流破壊は、原理的には洪水外力に対する耐力との大小関係で決まるが、耐力には種々の要素が関係し、どこが、どのような状態になって危険になるかを判断するのは容易ではない。洪水流の観測水位縦断形の時間分布と解析水位縦断形の時間分布を一致させて洪水中に起こっている水理現象を解明する方法は、洪水の水理を高精度に説明出来ても、堤防等の施設の安全性を判断するには無理がある。

これまで河道設計と関係する洗掘や堆積など主要な解析法は、その場所の流速、せん断力や乱れエネルギー等局所的な物理量に基づいて検討されて来た。河床面の洗掘、堆積等河床の変動については、重力の作用による局所的なせん断力が卓越する力であることから、運動方程式に基づき流速分布からせん断力を求める解析法は適切であると言える。しかし、河岸や堤防には局所的なせん断力だけでなくその周辺の種々の力が作用し破壊すると考えられる。これは、堤防や河道等の河川構造物は大きさ、広がりを持っており、局所的に大きな外力による洗掘、堆積が起こっても、構造物として損傷に耐え破壊に至らない場合が多く、このことを意識して河

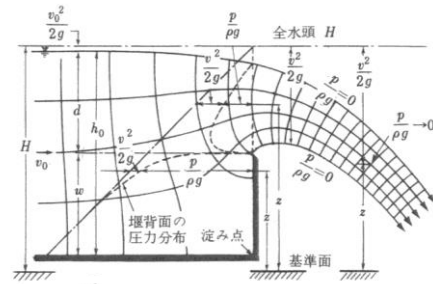


図4 刃型堰を超える流れのフローネット、堰上の圧力分布・流速分布<sup>14),15)</sup>

川構造物の破壊を議論することが必要である。すなわち、破壊はせん断力、圧力勾配、慣性力、重力等構造物に作用するすべての力を考慮したエネルギー分布の変化の形で捉え議論することが重要と考える。これを可能にするのは、河岸や堤防の洗掘、堆積箇所を含む河道の危険区間について、まずは非静水圧準三次元運動方程式より求まる時空間的な三次元水理量を求め検討し、次にこれらの水理量を用いて洪水流のエネルギー分布を求め、構造物の破壊との関係を調べることになる。具体的には、エネルギー分布の時空間変化の大小関係から、どこに、どれくらいの大きさの損傷が生じると構造物は破壊するかを判断することになる。

堤防の越流破壊や侵食破壊を洪水流のエネルギー分布の視点から論じるため、洪水流の連続方程式と非静水圧分布を考慮した準三次元運動方程式とエネルギー水頭を示す式(1)を用いて洪水流の三次元エネルギー分布の算定を行う。

式(3)、式(4)は連続方程式と非静水圧分布を考慮した準三次元運動方程式である<sup>2)</sup>。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$h \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j h \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \bar{p}'}{\partial x_i} - \frac{p'_b}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\partial h u'_i u'_j}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\tau_{bi}}{\rho} \quad (4)$$

流速  $u, v, w$  は、それぞれ次式で与えられる。

$$u_i = (u_{si} - U_i) \cdot (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + (u_{si} - u_{bi}) \cdot (-4\eta^3 + 3\eta^2) + U_i \quad (5)$$

$$w = \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_i \left( \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \eta \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( h \int_0^\eta u_i d\eta \right) \quad (6)$$

$$\eta = \frac{z_s - z}{h} \quad (7)$$

ここで、 $h$ :水深、 $z_s$ :水位、 $z_b$ :底面高さ、 $U_i$ :水深平均流速、 $u_{si}$ :水表面流速、 $u_{bi}$ :底面流速、 $u'_i$ :水深平均流速からの偏差流速、 $\bar{p}'$ :水深平均の非静水圧、 $p'_b$ :底面の非静水圧、 $\tau_{ij}$ :レイノルズ応力、 $\tau_{bi}$ :底面せん断応力である。 $i$ は1,2をとり  $x$ 方向と  $y$ 方向を指す。

式(3)から式(7)を基本式とし、水深平均流速、水表面流速、底面流速、水面でのスリップ条件 ( $du/dz=0$ ) を境界条件に用い、河岸沿いの多地点で観測された洪水水位

ハイドログラフに解析水位ハイドログラフが合致するように流れ場を解く。得られた水理諸量を三次元エネルギー式(1)に代入することによって、河道の各地点、各時間の三次元エネルギー分布とエネルギー勾配を求める。

本検討方法を洪水時に河川エネルギーの増大による氾濫の危険性が高い下記の①から⑦の河川区間に適用し、エネルギー水頭と堤防高の関係、越水、侵食による堤防破壊の危険性について検討が望まれる。

- ① 本川と支川の合流点とその付近の堤防区間
- ② 河川横断構造物を挟む堤防区間
- ③ 峡谷から扇状地へ出て来る堤防区間
- ④ 地形的に狭窄部となっている河道の直上流の堤防区間
- ⑤ 低水路が蛇行する複断面河道区間で、高水敷の広がり方や大きさが縦断的に変化する堤防区間等

比較的単純な河道断面である⑥、⑦については、まずは一次元解析によるエネルギー水頭と堤防高の関係を調べ、必要な場合は①～⑤と同様の解析法を適用する。

- ⑥ 都市を流れる急流河川で、単断面河道の堤防区間や掘り込み河道区間
- ⑦ 中小河川で流速が早い築堤区間等。

次に、堤防の高さ、堤防の余裕高について洪水流の水位、三次元エネルギー分布との関係で議論する。余裕高は、船舶工学の分野で大洋を航行する船舶の船首部分に造る波が、上甲板に悪影響を与えないように船舶の満載喫水線上に設定する高さ、Free Boardを船舶の大小に対応して設定されたものと言われている。河川の堤防の余裕高も河道のHWLから堤防天端までの高さとして、計画高水流量との関係でその大きさを決めている<sup>5)</sup>。

堤防の計画、設計等の考え方、決め方は、気候変動環境下においては、近年の新しい技術を含めた議論が必要であり、これには洪水流、河道、堤防を一体的に捉えた設計が行われるべきと考える。流れのエネルギー水頭は洪水流量ハイドログラフと河道の縦・横断面形に応じて決まり、堤防高さが堤防際の洪水流のエネルギー水頭より十分高ければ、河道から洪水流が越流することなく流れる。HWLを超える超過洪水水位で洪水が流れている場合には、三次元的な流れによる速度水頭増加分、非静水圧分布を含めた圧力水頭の変化分の高さや堤防余裕高の高さの関係が堤防の安全性に関係する。河道の水衝部では渦運動に伴う激しい三次元流れによる流速変化と圧力変化が作用し、洪水エネルギーが高くなり越流や河岸侵食を受け易い危険な箇所である。

洪水時の堤防の余裕高に及ぼす洪水エネルギー水頭の重要性を示す例として、支川からの洪水が本川洪水に流入する河川合流部の流れがある。合流部では本川洪水のエネルギーに支川洪水のエネルギーが加わるため洪水のエネルギーが増大する。実際には、合流部では本川流れと支川流れの間の激しい混合等によるエネルギーの損失があり、洪水エネルギーは、本・支川の洪水エネルギーを足し合わせたものとはならないが、それでも支川から

のエネルギーの流入により合流点ではエネルギーは上昇する。合流点のエネルギー上昇は本支川の上流に伝わるが最大到達距離は摩擦等によるエネルギー損失はあるものの合流点のエネルギー高さとはほぼ同じエネルギー高さの本川、支川位置まで及ぶことになる。

改定・河川管理施設等構造令の解説<sup>5)</sup>では、堤防の余裕高は、洪水時の風浪、うねり、跳水等の一時的な水位上昇や、流木等の流下物への対応、洪水時の巡視や水防活動を実施する場合の安全の確保、等にとって必要な余裕の高さであり、構造上必要とされる高さの余裕として位置づけられている。計画上の余裕は余裕高には含まれていない。この理由は、河床変動による水位上昇、湾曲による水位上昇、本支川合流による水位上昇、水位計算の誤差等は、計画上の水位に考慮されるためであるとしている。しかし、一次元解析法、準二次元解析法では、計画に含まれているとされるこれらの諸量の計算精度は高くない。また河道断面形の縦断変化が大きく、そのため流速が縦断的に大きく変化する場合や合流点、水衝部等では、HWL付近の水位に留まっていたとしても、エネルギー水頭が堤防天端の高さに達することは起こり得る。同様に、洪水流の持つエネルギーに対して、それを受ける河道の河積が広くなければ、また、下流へのエネルギーの輸送が滑らかに行われない河道区間や洪水中に流下障害が起こり局所的に大きなエネルギー上昇が起こる河道では、越流氾濫が起こることも考えられる。

中小河川では計画の規模が小さく、計画を超える洪水の頻度が高いため、越水被害を極力小さくするための配慮として河道は、所定の余裕高を持たない低い堤防を計画することが出来るとしており<sup>5)</sup>、余裕高の無い掘り込み河道が一般的である。しかし、都市の中小河川においてはほぼ河道満杯の水位で洪水が流れると地盤高や堤防高よりエネルギー水頭は高くなり、ひとたび溢流すると急激で激しい氾濫流が生じ被害が大きくなる。都市中小河川の掘り込み河道では、エネルギー水頭に考慮した余裕高の検討が必要である。

### (3) 堤防と河道の一体設計の考え方

最後に、本章の(1)、(2)での議論を受けて、河道と堤防の一体設計のための一つの考え方をまとめる。図-5は、福岡<sup>89)</sup>が我が国109水系一級河川の基準地点における計画河道(幅B)に計画高水位を超えないように計画高水流量Qが流れた時の計画断面形諸元を用いて、無次元計画高水流量に対する、無次元川幅、無次元水深の関係を整理した結果を示す。この関係図と図中の式は、計画高水流量が計画高水位で流れたとき、水理的に安全に流れる河道断面形(川幅と水深)を与えており、これは超過洪水に対する河道と堤防高さを一体とする考え方に基づいており、著者の主張する考え方の実践である。気候変動の影響を考慮した計画高水流量は、現在の計画流量の1.2倍程度と考えており1.2倍の流量を図-5の計画流

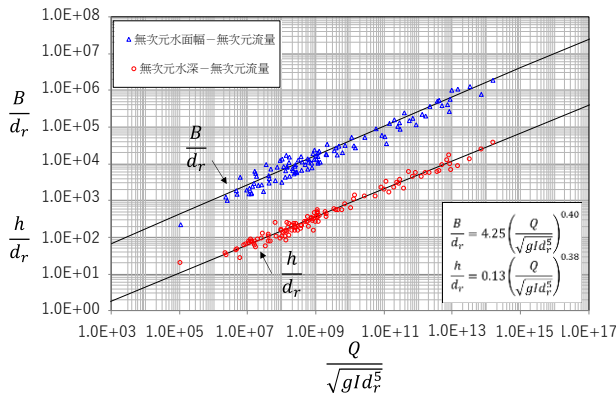


図5 計画河道における無次元計画流量と無次元水面幅、無次元水深の関係<sup>(6)7)</sup>

量の値に用いることが一つの考え方となる。さらに、余裕高として図5より求まる計画高水位相当の水面高さに例えば、計画流量に対応する運動エネルギーを加えることによって、計画高水流量に対する堤防と河道を一体的に考えた堤防高さや河道断面形を得ることが出来る。今後多くの河川で超過洪水流量と河道水位データを収集し、提案された考え方の妥当性の検証を行う。

#### 4. おわりに

本論文では、近年のHWLを越える大洪水において、現在の技術基準では説明が困難な新しい水理事象の発生が見られること<sup>34)</sup>、気候変動下においては洪水流と河道の特性に応じた選択可能な多様な洪水解析法の整備と新しい水理事象の説明には非静水圧分布を考慮した準三次元洪水流解析法が必要なこと、堤防や河道の設計にあたって三次元エネルギー分布の導入を考える必要があること等が述べられた。

主要な結論は以下のとおりである。

1. 超過洪水に対する堤防と河道の設計法の課題を示し、一体的設計法の必要性を論じた。
2. 非静水圧分布を有する準三次元運動方程式、連続方程式から洪水流の三次元エネルギー分布を求める方法を提示し、運動方程式に基づく河道設計法の問題点を指摘し、河道の計画、設計、管理において三次元エネルギー分布を用いた解析法の必要性を論じた。
3. 堤防と河道の一体的設計に関して水位を指標とする現在の技術基準と洪水のエネルギー水頭を指標とする堤防高さの決め方を例に考え方を論じ、超過洪水データを用いた今後の検討の必要性を論じた。

#### 参考文献

- 1) 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。

- 2) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS)，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.75，No.1，pp.61-80，2019。
- 3) 田端幸輔，後藤岳久，竹村吉晴，酒匂一樹，福岡捷二：令和2年7月球磨川豪雨における洪水流と氾濫流の一体解析による人吉市街地と狹隘区間の集落の被害分析，河川技術論文集，第27巻，pp.597-602，2021。
- 4) 長谷部夏希，後藤岳久，福岡捷二，榊井正樹：掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う洪水流，河床変動解析法の開発と昭和56年8月石狩川洪水への適用，土木学会論文集 B(水工学)，Vol.78，No.2 pp.967-972，2022。
- 5) 解説・河川管理施設等構造令改定，財団法人，国土技術研究センター編。
- 6) 福岡捷二：浸透破堤，侵食破堤，越流破堤の危険性の小さい堤防・河道の一体的設計法，河川技術論文集，第26巻，pp.53-258，2020。
- 7) 福岡捷二：洪水流のエネルギー水頭を考慮した堤防，河道の一体設計の重要性，第10回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp.1-4，2022。
- 8) 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形の決め方，1水工学論文集，第54巻，pp.1021-1026，2010。
- 9) 福岡捷二：招待論文，温暖化に対する河川の適応技術のあり方—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
- 10) 後藤勝洋，寺西浩三郎，後藤岳久，福岡捷二：多摩川中流部における河道の長期変遷(1947年～2020)から見た低水路河道の安定・不安定と河川植生の相互関係の分析，架線技術論文集，第28巻，pp.217-222，2022。
- 11) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，治水と環境の調和した川づくり，森北出版株式会社，2005。
- 12) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測洪水水位と水面形から河道の水理 SYSTEM を見える化する—，土木学会論文集 B1(水工)，Vol.73，No.4，2017。
- 13) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築について，河川技術論文集，第23巻，pp.251-256，2017。
- 14) Hunter Rouse：Elementary Mechanics of Fluid, John Wiley & Sons, Inc. 1945。
- 15) 日野幹雄：明解水理学，丸善株式会社，1983。

(2023.3.24受付)