洪水流の水位と流量の今日的考え方 —多点で観測された洪水水位と水面形から河道の 水理システムを見える化する—

福岡 捷二

フェロー 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

わが国の流域の社会・経済環境の変化、インフラストックの活用と生産性増大への要請は、治水事業の進め方の変化と具体的対応を求めている。河川の維持管理が重要な時代になり、これまでの治水施設のストック効果を高めるためにも、また地球温暖化に対する適応策の効果的な実行のためにも、河川堤防やダム等の治水施設により流域の洪水流量をコントロールし、流域の適切な流量配分を行えるように洪水流の水位と流量の新しい関係の構築が求められている。

本文では、洪水観測水面形を用いた解析法の必要性を示し、この解析法が河川堤防、ダム等治水施設による洪水流量の適切なコントロール、バランスの見積もりを可能にすること、広域的・総合的な視点から河川管理につながることを示した。次に、この解析法を平成 27 年 9 月の鬼怒川洪水流に適用し、洪水水理現象を広域的、総合的に把握し、流域全体の治水施設による水量分担を見積もることにより、洪水水面形が河川管理と洪水水理現象の見える化に重要な役割りを果たすことを示している。

Key Words: flood flow, water surface plofile, water level and discharge hydrographs, bed variation

1. 問題意識

洪水流量は、古くから河川の計画や設計にとって最も 重要な水理量であると考えられてきた。河川流量の観測 は、浮子を用いて行うのが一般的であるが、最近では、 電波流速計、ADCP等の機器を用いた観測も行われてい る。流量観測および流量解析の精度向上は重要であるが、 何のために精度向上を図るのかについては、河川の解決 するべき課題との関係の中で検討する必要がある。

流量は一断面の観測によって評価しており、その地点の河道や河床形状等の影響を受けやすいことから、福岡らり、福岡っは、河道特性を反映した十分長い区間での観測水面形の時間変化を用いて、流速場と流量等を基礎方程式を介して解析的に求める方法が河川流域の水理システムの理解に適していることを、長年にわたる現地河川での調査研究で明らかにし、多くの有用な知見を得てきた30.しかし、今なお一地点で洪水流量を見積もることの関心が高く、洪水水面形の時間変化の持つ有用な情報が、河川の維持管理や地球温暖化適応策の実行、社会の生産性に与える治水施設のストック効果の見積もり、洪水流の見える化による円滑な避難活動等、治水上の重要施策の解決に十分反映されていないように思う。特に、洪水水面形の観測情報は、河道とダム等、流域全体での

各治水施設の水量分担量や能力の見積りを可能にし、流域治水の展開につながると考えられる.

著者ら⁴は、平成27年9月に大規模な洪水氾濫が生じた鬼怒川下流区間について、洪水水面形時間変化の観測値を用い、非定常準三次元洪水流・河床変動解析モデルを構築し、流下能力、河道貯留機能、更には越水及び破堤による氾濫量を求め多くの重要な結果を得た.

本文では、洪水水面形に基づく解析は、流域水理システムの理解、その結果としての流域における治水施設の適正な水量配分の評価を可能にするとの著者の考えを一層進めるため、ダム群を含む異なる河道特性を持つ鬼怒川上・中・下流全区間に解析を拡張し、平成 27 年 9 月の洪水水理現象を広域的、総合的に流域治水の視点から検討している。研究結果は、観測洪水水面形の洪水流下機構、河川管理に果たす役割を明確にし、河道貯留量、貯留率、治水施設の水分担量等の定量的評価から、流域全体にわたる洪水水理現象の見える化を行うことにより、新しい流域治水の方向を示している。

2. 河道計画・管理のための水理量ー洪水流量と 洪水水位の考え方の変遷

昭和 30 年代までの我が国の河川は、脆弱で低い河道

整備率のために頻繁に洪水氾濫を受けたことから,河道やダム等の治水施設の整備が河川事業の最も重要な課題であった。洪水に対する河川の安全性を高めるためには,如何にして河川の水位を下げるかが重要であり,そのために外力としての計画高水流量の大きさと河道整備,貯留施設の適切な配置といった施設整備に関心が向けられた。当時は,洪水災害が多く,災害を受けた地先の河川改修が優先的に行われ,河道における洪水流下能力向上が整備の中心課題であった。このため,計画を超える洪水流量が発生するごとに,計画高水流量が見直され,治水計画の最も重要な課題は計画高水流量配分を決めることにあった。

計画高水流量は、計画降雨に対して貯留関数法を用いて流出計算を行い決めることが一般的に行われてきた。 求めた流量に対し、簡単には、以下に示す開水路単位幅での非定常の一次元連続式(式(1))と運動方程式(式(2))に基づいて河道の洪水流解析が行われる。式(1)、(2)は流量 Q を用いて書き換えると、それぞれ式(3)、(4)となる.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}}$$
 (2)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial r} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{1}{A}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}\frac{Q^2}{A} = -g\frac{\partial H}{\partial x} - g\frac{n^2}{h^{4/3}}\left(\frac{Q}{A}\right)^2 \tag{4}$$

ここに、h: 水深、V: 断面平均流速、H: 水位、g: 重力加速度、n: マニングの粗度係数、A: 流水断面積、Q: 流量である.

式(2)は運動方程式を勾配形式で表現したものであり、右辺第一項の水面勾配が駆動力となって流動が生じている。式(3)、(4)は、QとHがそれぞれxの1階偏微分形で表現されていることから、上流端境界条件としてQのハイドログラフを、下流端境界条件としてHのハイドログラフを与えて、未知量HとVを時間、空間について解くことになる。これが、古くから用いられてきた一般的な河道の一次元洪水流解析法である。

昭和 40 年代,50 年代には,式(3),(4)の時間項を省いた不等流式を用い,上流端でピーク流量,下流端でピーク水位を境界条件として与え,洪水ピーク水位の縦断分布が洪水後に縦断的に数多く測られた洪水痕跡水位に近似的に一致するようにピーク流量時の水位と流速について解き,河道の流下能力等が検討されてきた.洪水の痕跡水位は,各地点でピーク流量が発生したときに川岸境界に付着した洪水の最高水位を示す.この手法は,定

常流解析であるため、上流端境界条件に用いたピーク流量が、解析対象区間のどこでも保存されると仮定し解いている。流域面積の大きい河川では、大洪水時のピーク流量はかなり長い時間続くことが多く、この状態はほぼ定常状態と考えられることから、ピーク流量を用いた不等流計算は有効な解析法である。また、洪水痕跡水位は、洪水ピーク流量時の水理現象を空間的、連続的に見ることが出来、さらに河道の粗度係数分布の算定を可能にする等貴重な洪水情報を与えてきた。

近年では、河道形状が縦横断的に複雑で一次元的には表現できない河道においては、洪水流の平面二次元解析¹⁾、準三次元解析⁵⁾等が実行されることが多く、上流境界、下流境界で水位 *H* を与条件として水理量の時間、空間分布が計算される.

水位観測点は、国が管理する河川であっても平均的に約 10km 間隔で設置されており、洪水痕跡水位のような空間的に密な水位情報とはなり得ていない。このため、観測水位は、洪水水位波形の縦断変化の考察や痕跡水位を用いた解析の妥当性の検証等に使われることが多い。

3. 多地点で観測された洪水水位に基づく縦断水 面形の持つ重要性ー維持管理, 地球温暖化時 代の河川技術

流量は単位時間に河道の一断面を通過する水の体積で 定義される。多くの断面で流量を直接計測できることが 望ましいが、大量に、激しく流れる河道の洪水流量を直 接測定することは現在の技術を以てしても困難であり、 断面内の流速分布と水深分布の測定から流量を求めるこ とになる。一般に、河道は複雑な形状をしており、さら に、土砂で形成されている河道の境界は、洪水時に侵食 や堆積作用を受けるため、流速分布や水深分布は空間的 に変化している。また、洪水流の非定常性と河道の断面 形の縦断変化は、増水時には河道内で洪水流の貯留を、 引き水時には下流河道への放水をもたらし、流量ハイド ログラフと水位ハイドログラフの縦断的変化を引き起こ す。これらの水理現象は、広い区間にわたって水面下の 洪水流動に影響を与え、河道の縦断的な水面形の変化と なって顕われている。

本文で強調したいことは、今日、洪水観測技術が著しく改善され、大量の水位データが高精度に収集でき、またコンピューターが有力な解析手段になっている状況の中でこれらを適切に活用し、河川ごとに、また洪水ごとに異なる伝播特性、力学特性を持つ洪水流をより科学的に扱うこと、また河川ごと、洪水ごとに特有な挙動を表現している洪水水面形の時間変化を計測し、これを各河川の洪水流動が適切に説明可能な非定常解析モデル(一次元解析モデル、平面二次元解析モデル、準三次元解析

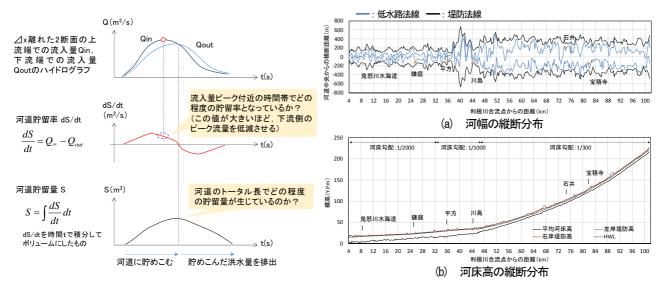


図-1 流量ハイドログラフと河道貯留率、貯留量

図-2 鬼怒川の縦・横断河道特性⁴

モデル)に取り込むことによって、洪水流を見える化し、住民に洪水の実態を理解してもらうことである.しかし、洪水流の解析には、古くから使われている貯留関数法、不等流解析等に準じた解析法が使われることが多く、そのことが依然として流量に重きを置いた河川技術、調査研究であり続けているように思う.例えば、一次元非定常流の基礎式(3)、(4)に対し、上流境界で流量、下流境界で水位を与え、水位の時間・空間変化を求める計算が行われている.この解法は原理的に正しいが、前述の洪水流の本質解明には不十分で、これからの時代の河川の在り方の議論をする上で、以下の方法が建設的である.

その解法とは、観測で得られた多数の水位を連ねた縦断水面形の時間変化を与え、これを満たす流れ場を解く解析法、すなわち、式(4)の右辺第一項である水面形を既知量として、流量は未知量とする解析である。河川の流れを引き起こす駆動力は水面勾配であり、観測水面形には河道内で起こっているすべての水理現象、すなわち、洪水流の非定常水理現象、河床や河岸の侵食・堆積変化を含む河道断面形の変化、河川構造物や樹木等の存在に伴う流れの変化等が時・空間的に反映される。観測水面形を用いた解析法の利点は、河道システムで相互に因果関係を有する洪水の水理現象を統合的に評価することが出来ることにある。この方法により、水面形が計測されている区間における任意地点の流量ハイドログラフ、流速分布、河床高さの変化等を定量的、一体的に評価が出来、これらは河川管理上重要な情報となる。

洪水の水理現象とその広域に及ぶ役割の解明と、この結果を河川の管理に生かすことがこれからの重要な課題である。多くの河川は整備途上にあり、ひとたび災害が起こるとその被害が著しく大きくなる。このため、被害が生じた地先周辺の洪水現象の調査だけでなく、被害を

起こした原因を広域的,総合的に解明することが必要となる.災害原因の究明のための洪水解析技術とそれに供する現地観測用の機器,観測技術の高度化は車の両輪である.水位に重点を置いた観測と洪水解析は,準二次元不等流解析から河道特性と洪水流特性を考慮に入れた二次元不定流解析,準三次元不定流解析へと展開してきており,観測水面形を用い流量,流速分布,河床高等を一体的に算定し広域的,総合的な河川管理を行える段階にきた.これは,圧力式水位計を必要な個所に設置することによって多地点で測定した同時水位を縦断的に連ねた水面形の時間変化を得ることが出来るようになったことが大きな要因である.今後は、時々刻々の水位観測データを解析プログラムを実装したコンピューター上でオンライン洪水流解析を行い,洪水流の見える化に基づく河川管理に生かすことが求められる.

自治体が管理する河川は、河川数が多いこと、財政的事情もあって、代表的な河川を除いて、流量観測、水位観測が行われていない.上述したように洪水水面形は、それぞれの河川の洪水伝播の機構を表すうえに、流量に比して測定することが容易であり、得られる洪水水理情報も圧倒的に多い.洪水水位を測り、河川の洪水特性を理解し管理に当たることが強く望まれる.

4. 観測水位縦断形を水面での境界条件とした洪水流・河床変動解析 ー平成 27 年 9 月鬼怒川洪水流解析から得られた洪水流の本質的理解と河道水理現象の見える化

前章まで述べた本論文での洪水水位の今日的意義を実証するため、水面形の時間変化を用いた洪水流の解析法を鬼怒川全区間に適用し、平成27年9月の溢水、氾濫

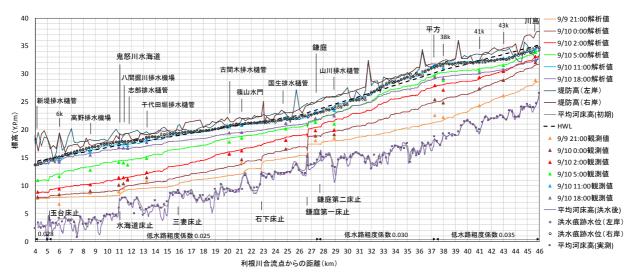


図-3 鬼怒川下流区間の水面形の時間変化の解析値と観測値の比較 4

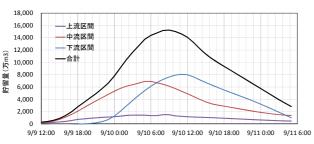


図-4 平成27年9月洪水における鬼怒川河道の貯留量

を含む洪水水理現象の全体像を説明し、今後の河川管理、流域治水の展開にどのように生かすかを示す.

検討範囲は4.2kmから五十里ダム、川治ダム下流の 132.5kmまでとした. ただし、水位観測所が4箇所と少な く,河道断面データも不足していた101.5~132.5kmの県 管理区間では、4地点での観測水位データで水面高の時 間変化量を代表し、川幅、区間距離を掛けることで貯留 量を概算した.一方,多地点で水位が観測された 4.2~101.5kmの直轄区間では、先の鬼怒川下流区間の検討 4と同様に、観測水面形の時間変化に基づいた準三次元 洪水流・河床変動解析を実施した. 上流断面には宝積寺 (82.57km), 下流断面には新堤排水機場(4.2km)の観 測水位ハイドログラフをそれぞれ与えた. 高水敷の粗度 係数は地被状況に基づいて設定した. 溢水解析は、対象 区間の堤防断面形状及び堤内地をモデル化し、河道水位 が堤防高を越えると堤内地側へ溢水するようにした. 決 壊地点である21.0k付近の左岸堤防では、洪水時の決壊 幅の時間変化の値6と敷高を与え、決壊地点周辺の解析 水面形時間変化が観測値を再現するように氾濫量ハイド ログラフを算出した.

洪水流は、時・空間的に水位、流量を変化させながら下流に伝わる水理現象であり、代表的諸量として、水位 Hの他に、 \mathbf{Z} -1 に示す流量 Q、河道貯留率 dSdt、河道 貯留量 S の時間的、空間的変化が挙げられる。 \mathbf{Z} -2 は、鬼怒川の中流部(101.5km \sim 46km)と下流部(46km \sim

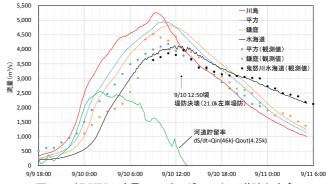
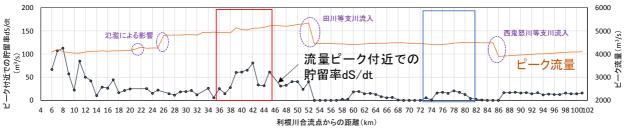


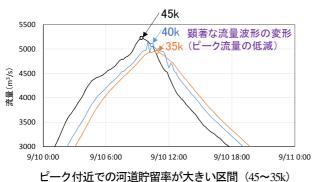
図-5 観測所の流量ハイドログラフと河道貯留率 4

4km)の河幅と河床高,河床勾配の縦断変化を示す.中流部は勾配,河幅とも変化は小さいが,46km付近で河床勾配が大きく変化し、また下流部の河幅の変化が顕著である.図-3は、川幅、低水路幅等の河積の縦断変化が顕著な46km~4.2kmの鬼怒川洪水流の水面形の観測結果とSBVC法を用いて得られた水面形の解析結果の比較を示す.河積の変化が小さな河道では、一般に各時間の洪水水面形は河床にほぼ平行となる.しかし、鬼怒川の下流区間の河積は著しく変化しており、そこに時間的に変化する洪水流が流れるために、河道の貯留量が大きく、各時間の観測水面形は互いに平行とはならず、水面と河床面の間が広がったり狭まったりしながら流下する.

洪水解析と河床変動解析では、各時間の観測水面形と解析水面形がほぼ一致するように計算される。洪水流は、基礎式(4)の右辺第一項の水面勾配が外力項となり、これによって流れ(HとV)が生じる。前述のように、従来は、上流端と下流端で境界条件を与えて、水位と流速を未知量として解いていたが、今日では、水位を多地点で高い精度で測ることは容易であり、これまで未知量として扱われてきた水位の縦断観測値(水面形)を既知量とし、これを解析に導入して観測水面形に一致するように流れと河床高を解くことにより、洪水流れの構造を知ることが出来る。この解析方法では、各時間の観測水位



a) 流量ピーク付近での貯留率とピーク流量の縦断分布





(b) 河道貯留率の異なる2区間での流量波形の変形の違い 図-6 鬼怒川における貯留率、ピーク流量の縦断分布と流量波形の変形特性

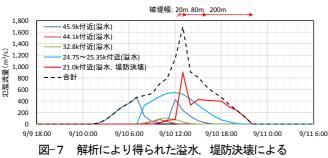


図-7 解析により得られた溢水、堤防決壊による 氾濫流量ハイドログラフ⁴

を連ねた水面形を水面の境界条件として与える。この条件は、従来法の検討区間の上流断面と下流断面の水位ハイドログラフについても、他の水位観測地点と同様に考慮される。これによって、検討区間内の未知の境界面は、河床高さだけであり、境界内の水理量と河床高さについて解くことになる。

洪水流の基本式に河床での土砂移動の連続条件を加え、観測した時間的な水面形を既知量として、時々刻々の流れと河床変動を解くことによって洪水による河床変動が考慮された任意地点の流れQ,Vと河床高zが同時に求まる。解析で求められた流量Qは、河床変動も同時に解いているため、解析精度は高くなる。

図-3 に示すように、鬼怒川の河床変動解析結果は洪 水後の河床変動結果をかなりの程度説明出来ており、洪 水時間中の河床変動も解析的に推定出来ると考えてよい。

図-4 は、観測水面形の時間変化に基づいた非定常準三次元解析により求めた上流区間、中流区間、下流区間の貯留量 S の時間変化を示している。下流に比して中流、上流区間は、洪水流量が小さく河道断面積の縦断変化が小さいために河道 1km あたりの洪水貯留量は小さい.

図-5 は鬼怒川下流部の平方,鎌庭,鬼怒川水海道地点 の流量ハイドログラフの観測値と解析値を示す. 川島で は流量観測は行われなかったため、図-5には解析値の みを示している. いずれの観測地点も縦断的に断面変化 の大きい区間に位置しているが、解析流量と観測流量の の対応は、概ね良いと言える。図-5 には、下流河道区 間(46km-4.2km)での貯留率の時間変化の解析結果も示 す. 川島での解析ピーク流量は、約 5200m3/s であり、流 量ピーク時の下流区間の貯留率は 1670m3/s である. 河幅 変化の大きな区間を含むため、貯留率はピーク流量の 32%にも達し、ピーク流量の低減に大きく効いている. 当該地点のピーク流量の低減には、その近接上流区間の ピーク流量発生時間帯(本検討では2時間)の貯留率が 有効に働く. 図-6 (a) は, このようにして算定された 中流区間と下流区間のピーク流量の縦断分布と流量ピー ク付近の貯留率の縦断変化を示す. 図においてピーク流 量が急増・急減しているのは、それぞれ支川流入と洪水 氾濫量をこの地点で集中的に与えたためである. 図-6 (b)は、5km離れた2地点間の流量ピーク値の低減によ る波形変化を示す. 下流域は中流域に比して貯留率が高 く、ピーク流量が顕著に低減していることがわかる.9 月9日18:00から10日13:00の洪水期間中の下流区間 の河道貯留率を積分した量から堤内地の氾濫量を差し引 いて算定した下流区間の河道貯留量は 7800 万 m³である (図-4). 対象とする鬼怒川洪水では、堤内地での大規 模な氾濫流が生じた. 図-7 は、洪水位が堤防天端高を 超えた地点で発生した溢水量と 21.0km 付近左岸での堤 防決壊による氾濫量の時間分布を解析したもので、鎖線 で示された合計氾濫量は 4000 万 m^3 と推算された. また, 堤防が決壊するまでの時点での鬼怒川上流から下流の河道区間には、1.3 億 m^3 の河道貯留量が見積もられた(\mathbf{Z} -4). この時上流ダム群には、約 1 億 m^3 の水がたまっていた 7 . このように堤防整備による河道における洪水貯留とダム群貯水池による貯留が一体として流域の治水効果を発揮していることがわかる.

以上,鬼怒川の洪水水面形の詳細な観測値を用いた流れと河床変動の解析結果から,洪水流量がダムと河道で 貯留分担され,変形しながら河道を伝播して行く機構が 明らかにされ,洪水水面形が洪水流の理解にとって本質 的で重要な情報を与えることが示された.

治水事業は、極めて専門性の高い分野であり、国民の理解なしには進まない、人々にわかりやすく、見える化して洪水の実態説明に知恵を出すことが私たちに課せられ重要な課題である。河川の水防作業は水位を指標に行う、更に、堤防に作用する洪水外力は、洪水・河床変動解析から求まる堤防沿いの水位ハイドログラフと洪水継続時間である⁸、今日行われている流量で表現される洪水流では、多くの人々の理解を求めることは困難である。一方、水位は堤防や橋の高さとの相対関係で表現するなどにより氾濫の危機的状況などを理解しやすい、水位縦断形を時々刻々観測し、これを見える化し、また解析によって分かり易い洪水情報として示すことが今後の重要な方向である。

5. 結論

観測された洪水水面形の時間変化データを, 時々刻々の水面での境界条件として用い, 流速分布と河床高さを未知量として基礎方程式を解くことにより, 流速場, 水位・流量ハイドログラフ, 河床変動等洪水水理現象を時・空間的, 広域的に求めることが可能であることを示した. この考え方を平成 27 年 9 月の鬼怒川洪水に適用し, 河道及び洪水調節施設による貯留量, 貯留率等から

流域に存在した洪水水量分布を求め,河川流域の洪水水 理現象の見える化を行った. さらに,このようにして得 られた結果を流域全体にわたり広域的,総合的に治水計 画,河川管理へ繋げることの必要性について議論した.

謝辞: 鬼怒川洪水流の解析, 取り纏めに際して, 田端幸輔博士(中央大学研究開発機構 助教) との議論は大変有益であった. 国土交通省関東地方整備局河川部にはデータの提供をいただいた. 記して感謝する.

引用文献

- 1) 福岡捷二,渡邊明英,原俊彦,秋山正人:水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水ハイドログラフと貯留量の高精度推算,土木学会論文集,No.761/II-27,pp.45-56,2004.
- 2) 福岡捷二: 洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術,河川技術論文集,第 12 巻, pp. 1-6,2006.
- 3) 福岡捷二: 実務面から見た洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性,河川技術論文集,第20巻,2014.
- 4) 福岡捷二,田端幸輔,出口桂輔:平成27年9月洪水における鬼怒川下流区間の流下能力,河道貯留及び河道安定性の検討,河川技術論文集,第22巻,pp.373-378,2016.
- 5) 内田龍彦, 福岡捷二: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面 流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論 文集 B1 (水工学), Vol.71, No.2, pp. 43-62, 2015.
- 6) 国土交通省関東地方整備局:第2回鬼怒川堤防調査委員会資料,2016.
- 7) 関東地方整備局, 鬼怒川ダム統合管理事務所: 鬼怒川上流 4 ダムの効果について~平成 27 年 9 月関東・東北豪雨対応 ~, 2016.
- 8) 田端幸輔,福岡捷二:堤防破壊確率と堤防脆弱性指標に基づいた堤防危険個所の推定法,第3回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム,pp.61-64,2015.

(2016.9.30 受付)

CURRENT SIGNIFICANCE OF WATER LEVEL AND DISCHARGE OF RIVER FLOODS

Shoji FUKUOKA

Water levels and discharges have been considered to be essential for planning, design and management of rivers. Developments of flood observation instruments, advancement of flood analyses and changes in social and economic environments have brought changes in views and measures for flood controls.

In the present paper, first, points of views up to now regarding the flood water level and discharge are outlined. Second, a new analysis method using observed water surface profiles is presented and using this analysis method, appropriate control and share of flood discharges for maintenance and management of rivers and adaptation against global warming become possible by means of dikes and dams. Lastly, new physical interpretations of flood hydraulics and significance of river management are demonstrated by applying the analysis method to the Kinu river flood of 2015.