

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

RIVER'S MAINTENANCE AND MANAGEMENT BASED ON OBSERVED WATER SURFACE PROFILES OF FLOOD FLOW

福岡 捷二¹
SHOJI FUKUOKA

¹ フェロー Ph.D 工博 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)

This paper emphasizes the necessity establishing the technical standard of river maintenance and management under the frequent occurrence of river disasters. The most important hydraulic information for this purpose is given by the water surface profiles of flood flows which tell us dangerous points from the viewpoint of river management and flood control. A new engineering method using observed water surface profiles and 2 D unsteady numerical computation throws light on unsolved important subjects of river management such as the estimation of discharge hydrograph under the complex river conditions and discharge hydrograph of flooding due to levee breach.

Key Words : *Water surface profile, 2D unsteady flow computation, river maintenance and management, discharge hydrograph, bifurcation, levee breach, roughness*

1. はじめに

近年の一連の豪雨災害に対応して、平成 17 年 4 月に豪雨災害対策総合政策委員会による「総合的な豪雨災害対策の推進について」の提言がなされた。この提言を受けて、国は防災から減災へと治水施策の転換を打ち出した¹⁾。本文では、最初に豪雨災害対策施策を実行するために必要なハード技術課題について述べ、次に、新しい技術としての洪水流の水面形のモニタリングと数値計算を用いて粗い精度でしか扱えなかった河川管理上の重要な 2 つの課題 (1) 河道の任意断面での流量ハイドログラフ、(2) 破堤時の氾濫流量ハイドログラフ等、を水理学手法によって定量的に見積り、維持管理技術の確立に向けて、水理学、河川工学の重要性を示す。

2. 防災施設等の整備・管理のためのハード技術の課題

(1) 河川管理の方向性と防災施設等の整備の質的転換

投資余力の減退、河川災害多発の中で、国民の生命財産を守るために、河川の維持管理の水準を維持していくことが必要である。このためには、現在の治水施設のストックを適正に維持管理し効率的に活用することと洪水

時や平常時の管理のデータの使い方、人、組織のあるべき形を見直すこと等河川管理の仕方を変えていくことが必要である。さらに、整備、管理の施策を効果的に進めるためには、施設の整備状況の評価、公表は不可欠であり、このことは、河川の災害安全度を早期に高める上で重要な柱となる¹⁾。

(2) 防災施設等の維持管理の充実

近年、施設規模を超える洪水の発生により堤防の決壊による壊滅的な被害が生じ、ハード整備による対策の限界、防災施設の維持管理と危機管理の重要性が再認識された。このため、経験的に行なわれてきた河川管理のあり方を見直すとともに、国民の生命財産を守るための最低限必要な河川の維持管理基準の設定及び河川ごとの管理方針・計画の策定が必要になった。

維持管理する対象は、堤防、施設、河道、流水であり、維持管理する項目は、調査、点検・巡視、維持修繕、施設更新等である。個々の項目について治水・利水・環境を目的とした維持管理行為の実施基準を作ることになる。それぞれの維持管理項目について、これまでの技術に新しい科学的根拠も加え、河川の特性に応じて必要な回数、頻度について実施水準を決めることになる。しかし、1 級河川、2 級河川など河川特性、背後地の重要性、有堤

河川が無堤河川か等によって維持管理のレベルをどのようにすべきか検討課題は多い。維持管理基準は、現場で維持管理を担当する者が、得られたデータより何が分かるのか、何に活用するのかを意識して仕事をするための規範となるものである。さらには、現場河川管理者と市町村、関係住民、NPO 等関係者の連携と相互理解を促す重要な役割をもつ。具体的には、排水機場の運転調整ルールの実施・適用に当たっての合意形成や、避難情報の発令の根拠となる雨量・水位等河川情報の共有等で、これらを365日の河川維持管理スケジュールとして作成し、確実に実施することになる。

3. 洪水流の水面形に着目した維持管理技術

(1) 水位に重点をおいた河川の管理の必要性

わが国の河川は、堤防で仕切られており、洪水はこの中を流れる。川幅が十分広いことから、堤防の表法勾配は垂直とみなしてもよい。このことは、高水敷に一度水が乗ると、水深によらず水面幅は一定とみなせることから、単位時間、単位流下距離あたりの二断面間の水量の増加は、この区間の平均的な水位上昇量で表すことが出来る。このことが、洪水時の代表的な水理量として水位を用いることが出来る大きな理由である。流れている流量がいくらといってもそれが具体的に何を意味するのかわからないが、水位が地域に親しまれている橋の桁下いくらかといえば洪水の危険の程度は想像がつく。実際、水防活動も、河川巡視も水位を見て行なっている。

洪水水位の時間的・場所的变化は、自記水位計を河岸沿いに適当な間隔（緩流河川では 2～3km 間隔）で配置すれば、必要な精度で求まる²⁾。河道状態（流路の縦横断面形、高水敷上樹木などの繁茂による粗度係数分布、河川内の構造物の存在等）の変化は、洪水流の水面の時間的・場所的变化や洪水痕跡の縦断形状に明確に現れる。図-1 は、平成 16 年 7 月福井豪雨による洪水によって越

水した足羽川の洪水痕跡水位の縦断形を示す。図-2 は、平成 16 年 10 月台風による神通川の洪水痕跡水位縦断形と河岸侵食箇所との関係を示す。足羽川の越水箇所や、神通川の河岸侵食区間では、水面形が折れ曲がっており、この区間で水位や流速が大きく変化し、河道の流下断面不足や縦断的に線形が悪い箇所が存在することを示している。このように、改修が必要な箇所、樹木など粗度管理の必要な箇所等、治水上危険箇所が水位縦断形の変化状況によって判断でき、河川管理の重要な指標のひとつになる。

(2) 洪水の流れから見た堤防の安定性の評価と危機管理

わが国の河川は程度の差はあるが改修途上にあるものがそのほとんどで、計画規模の洪水が発生した場合には、計画高水位を超え、時には、堤防から越流が生じる危険性が高い。

河川堤防設計指針では、漏水と洗掘による破堤を念頭に置いており、越流破堤は考慮されてこなかった。計画高水位を超えるような洪水流にあつては、危機管理上からも、洪水がどのような危険な流れ方をしているかを判断できる技術がなければならない。これには、3. (1) で示した堤防近傍の洪水流が局所的に危険な水面形、流速を呈する場になっていないかなど、河道内の流れから見て堤防の安定性を評価する技術が必要となる。浸透や洗

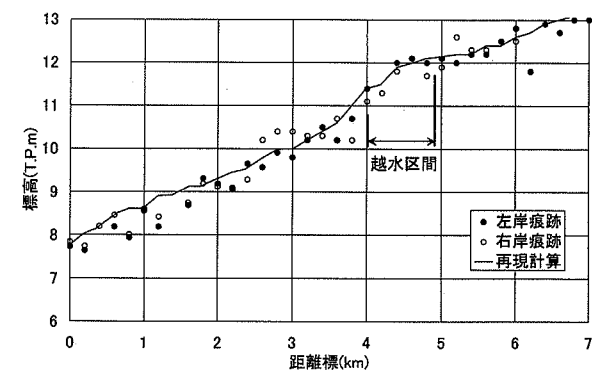


図-1 足羽川洪水痕跡水位と越流区間 (H16.7 福井豪雨)

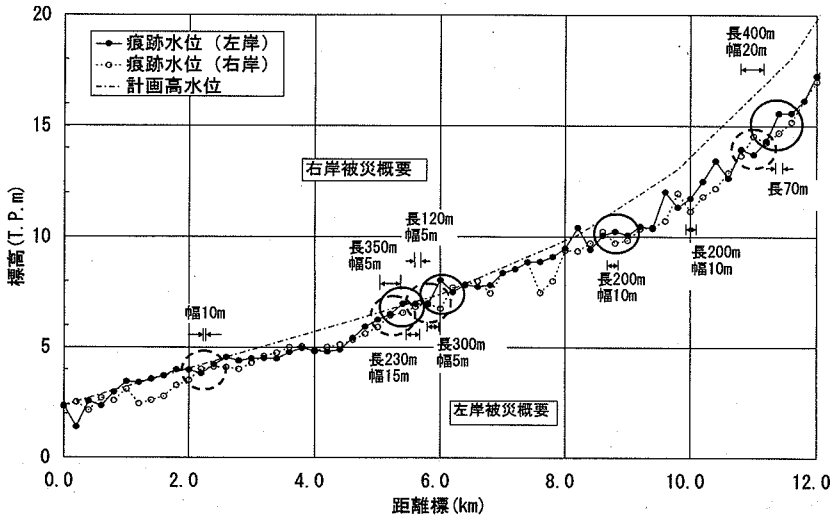


図-2 神通川洪水痕跡水位と被災区間 (H16.10)

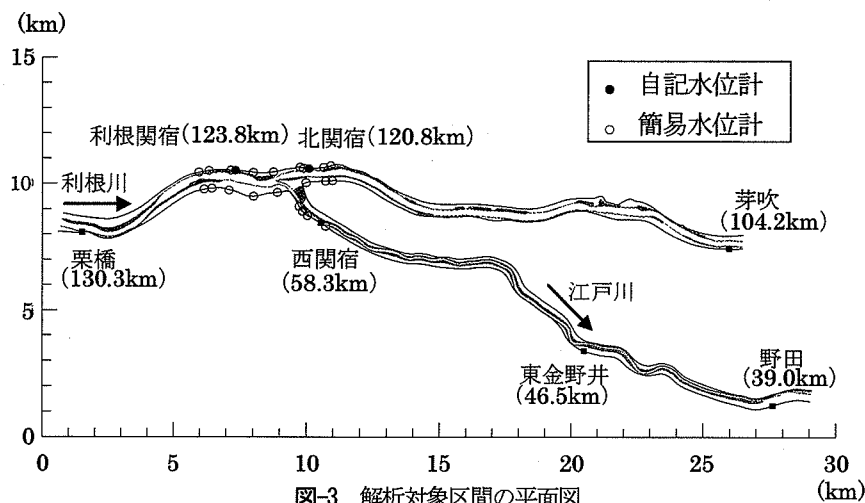


図-3 解析対象区間の平面図

掘に対する堤防の安定性や治水から見た堤内の土地利用のあり方の検討とあわせて、洪水の流れからみて堤防がどの程度の安定性をもつかを技術的に評価が出来ないと、河川の災害安全度を説明し得たことにならない。

改修途上の河川にあって、計画高水位までは、確実に破堤から守られなければならないが、計画高水位を超える危機的状況の中でも洪水が流下する場合がある。計画洪水水位付近の水位となって流れる洪水流に対し、水位縦断形に対する堤防余裕高構造の力学的検討は、危機管理との関係で十分議論を深めなければならない課題である。

(3) 洪水流の水面形、洪水痕跡水位を用いた流量ハイドログラフの算定

a) 解析方法と解析条件

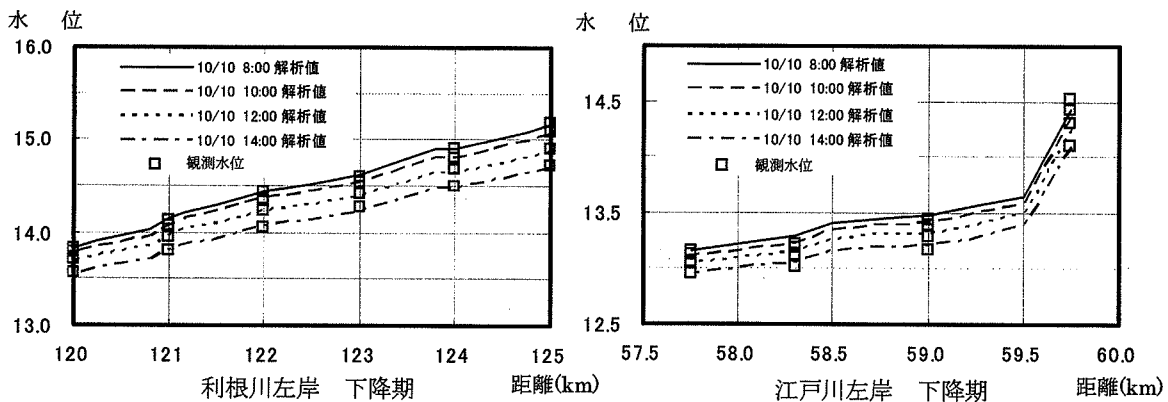
従来の洪水流解析では、洪水流は近似的に定常な不等流とみなすことが出来ると考え、各区間で洪水流のピーク流量を与え、不等流計算によって水位の縦断変化を求めている。また、非定常解析では、上流端で観測流量を下流端で水位を与え、水位、流量の時間変化を計算している。これらは、河川の計画や設計に一般的に用いられる方法である。しかし、浮子を用いて求める流量観測値と多点での水位観測から求まる水面形では、水面形の精度の方が流量観測精度よりも十分高い。福岡・渡邊ら^{2), 3), 4), 5)}は、観測された水面形が、洪水流れの解であることを利用して、水面形を用いた二次元非定常流解析によって種々の河道及び洪水条件下における流量ハイドログラフを求めている。解析の基本的考え方は実験水路内に所定の水面形を得る方法と同じである。水位境界条件となる上流端、下流端に池を設け、堰によって池の水位を調整しながら、各時間の水面形が実測水面形になるように粗度分布を調整する。

図-3 に解析対象区間の平面形状を示す。江戸川 59.5km 地点には、低水路に関宿水閘門、左岸河岸に中之島公園、左岸高水敷に高水路があり、これらを計算で考

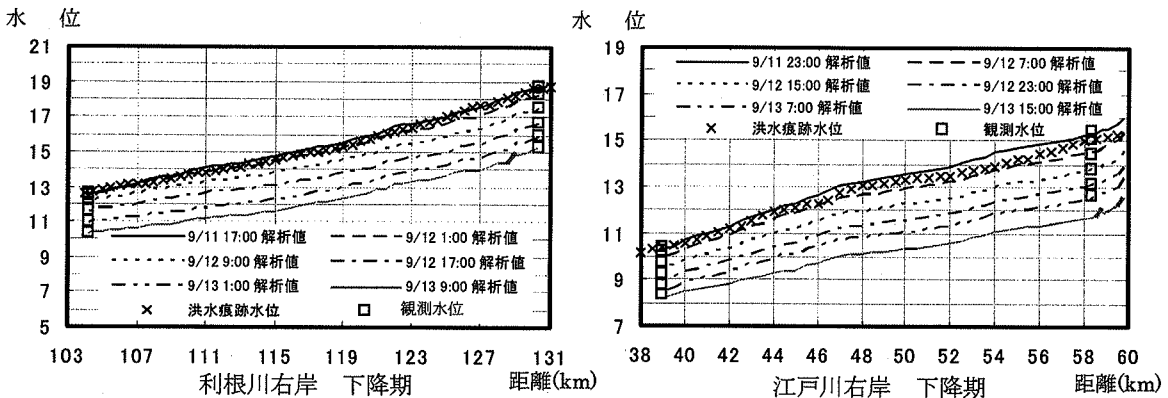
慮している。平成 16 年台風 22 号洪水の解析対象区間は、図-4 に四角で囲まれた区間で、上下流端の境界条件には、利根川の 120.0km, 125.0km, 江戸川の 57.75km 地点の観測水位ハイドログラフを与える。台風 22 号出水時では、○に示した箇所において水位が密に観測されている。境界条件となる上下流端に仮想の池を設け、これらの観測点における水位と計算水位が全体的に一致するように粗度分布、樹木群透過係数を決め、これらを用い流量ハイドログラフを求める。一方、平成 10 年 9 月、平成 13 年 9 月、平成 14 年 7 月洪水に対する解析対象区間は、利根川が芽吹(104.2km)～分派点(121.5km)～栗橋(130.3km)、江戸川が野田(39.0km)～分派点(59.75km)とする。上下流端の境界条件には栗橋、芽吹、野田における観測水位ハイドログラフを与える。これら 3 洪水では、栗橋、芽吹、野田以外の地点では平成 16 年洪水のように詳細な水位データは観測されていない。そのため、二次元非定常解析から求まるピーク水位の解析値が洪水痕跡水位と全体的に一致するように粗度係数分布と樹木群透過係数分布を決め、流量ハイドログラフを求める。このように求めた粗度係数と樹木群透過係数を表-1 に示す。

表-1 利根川の粗度係数・樹木群透過係数

平成 10 年, 13 年, 14 年		平成 16 年台風 22 号, 23 号	
右岸		右岸	
区間(km)	粗度係数($m^{-1/3} \cdot s$)	区間(km)	粗度係数($m^{-1/3} \cdot s$)
131.0-128.0	0.034	125.0-124.0	0.057
128.0-126.5	0.031	124.0-123.0	0.035
126.5-124.5	0.032	123.0-122.0	0.030
124.5-123.0	0.031	122.0-121.0	0.045
123.0-122.0	0.038	121.0-120.0	0.040
122.0-121.0	0.038		
121.0-116.5	0.032	右岸	
116.5-114.0	0.041	区間(km)	透過係数(m/s)
114.0-113.0	0.040	125.0-124.0	15
113.0-110.0	0.043	122.0-120.0	20
110.0-109.0	0.040		
109.0-104.0	0.043		
右岸			
区間(km)	透過係数(m/s)		
131.0-124.5	69		
122.0-121.0	56		
120.0-116.0	59		
115.5-114.0	56		
113.0-110.0	48		
107.5-107.0	48		
106.0-104.0	48		



(a)平成 16 年台風 22 号



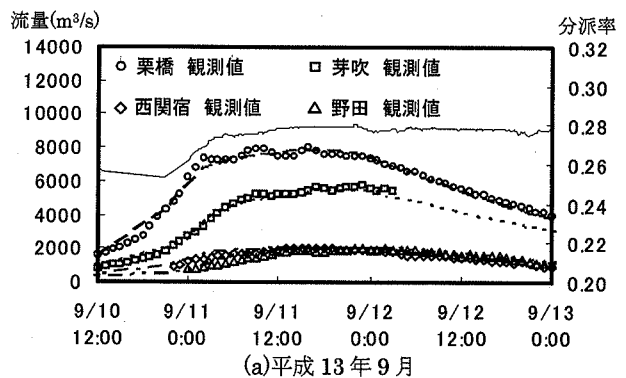
(b)平成 13 年 9 月

図-4 水面形の時間変化

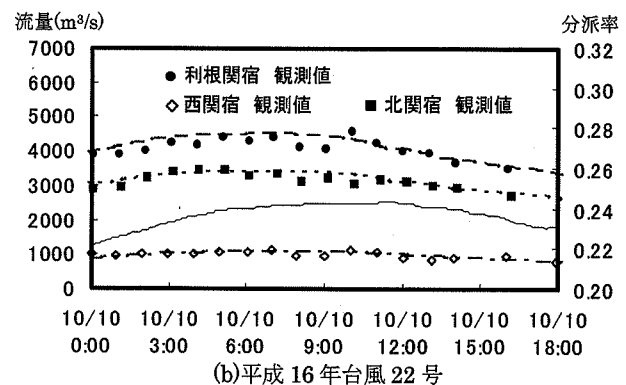
b) 本川、派川の流量ハイドログラフ

図-4(a)に、平成 16 年台風 22 号における本川利根川と派川江戸川の水水面形の時間変化を示す。利根川、江戸川の水水面形の時間変化の解析値は観測値と全体的に一致している。平成 16 年台風 23 号も同様に全体的に一致している。図-4(b)に、平成 13 年 9 月洪水における利根川と江戸川の水水面形の時間変化を示す。利根川、江戸川のピーク水位の解析値は洪水痕跡水位と全体的に一致している。(平成 10 年 9 月、平成 14 年 7 月も同様にピークの水水面形の解析値は観測値と全体的に一致している)。

図-5 に、各洪水における流量ハイドログラフの解析値と観測値、及び江戸川への流量分派率を示す。平成 13 年 9 月(平成 10 年 9 月、平成 14 年 7 月洪水)では洪水痕跡水位を再現するように粗度係数と樹木群透過係数分布を決め、流量ハイドログラフを求めているが、水水面形の時間分布が観測されている場合(平成 16 年 22 号、23 号洪水)とそれほど差が無く必要な精度で推算できている。以上のことから、縦断的に緩やかに変化する利根川・江戸川のような河道では、適切な粗度係数と樹木群透過係数を用いた二次元非定常解析による限りは、痕跡水位縦断形の再現からでも、二次元非定常解析によって必要な精度で流量ハイドログラフを推算することができる。



(a)平成 13 年 9 月



(b)平成 16 年台風 22 号

図-5 流量ハイドログラフと流量分派率

c) 粗度係数と樹木群透過係数分布

本解析法によって水水面形から流量ハイドログラフを求めるには、流路断面形と粗度係数や樹木群透過係数の場

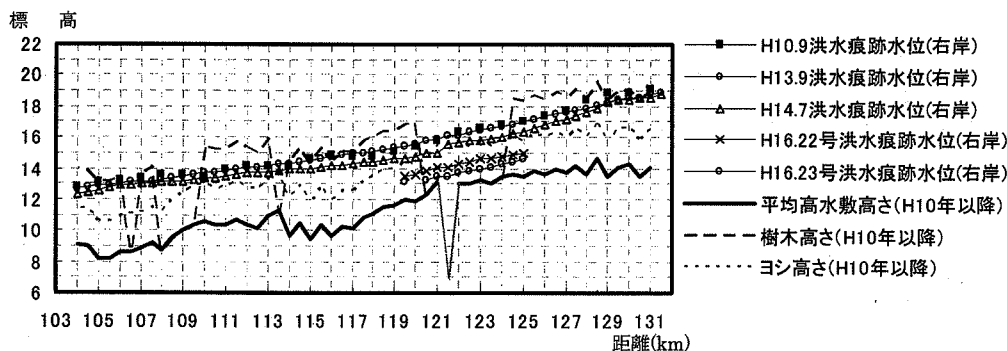


図-6 平均高水敷高と植生高及び洪水痕跡水位の縦断面図

所的分布が必要である。図-6 は、検討に用いた洪水痕跡水位の縦断面図、平均高水敷高と植生高の関係を示す。これによると、高水敷最大水深は、平成 10 年 9 月、13 年 9 月、14 年 7 月の洪水では 2.5m 以上であるが、平成 16 年台風 22 号、23 号では、2.5m 未満である。16 年洪水については、高水敷上に生えているヨシやオギ群が完全に倒伏しなかった程度に高水敷水深が低い。このため、平成 16 年の洪水の流れの抵抗が大きく、表-1 に示すように、平成 10 年、13 年、14 年洪水より粗度係数は大きく、樹木群透過係数は小さくなっている。洪水流の水面形に流れの抵抗の影響が現れるので、粗度係数と樹木群透過係数は、それぞれの水面形再現区間の平均値を表している。粗度分布は、短い縦断距離で求める必要は無く、樹木群分布の変化点など、流れの抵抗が変化するところで与えればよい。以上から、利根川、江戸川対象区間における粗度係数、樹木群透過係数分布は、高水敷上の水深が約 2.5m 以上となる洪水と、それ以下となる洪水の 2 パターンに分けて考えておけばよいことがわかる。

各河川についても同様に、河道の縦・横断面形、植生地被データ等を用い、出現した異なる洪水規模に対応する粗度係数と樹木群透過係数の分布を二次元非定常解析によって検討し、あらかじめ、大小高水敷水深の 2 パターン程度について粗度分布を算定しておくことが大切である。

(3) 破堤による洪水氾濫流量ハイドログラフの算定⁶⁾

(1) 解析方法と解析条件

平成 17 年の水防法改正によって氾濫予報が導入され

た。堤防の決壊により堤内地に氾濫流出する水量を高い精度で知り、氾濫水の進行予測ができるようにすることは、氾濫水の制御や広域的な避難行動の支援のために、重要である。これまで洪水氾濫量の計算は、測定誤差の大きい破堤点近傍の水位と破堤断面形を用い、適用性が低い堰の公式から求めてきた。3. (3) で述べたように河道における洪水流の水面形の時間変化が高い精度で計測されていれば、流量ハイドログラフを精度よく求めることが出来る。本川から分派していく河道(派川)の分派断面は、本川河道から見ると破堤断面とみなすことができる。このとき、江戸川の方派流量は利根川本川からの破堤氾濫流量とみることが出来る。このような考えで、利根川の水面形の変化のみを情報として求めた江戸川西関宿の流量ハイドログラフは、図-5(b)に示されたハイドログラフとほぼ同じ分布であったことから本解析法の破堤氾濫への適用が可能である。

このように、河道の水位縦断形の刻々の時間変化を与えることによって、破堤断面形状や堰公式を使わずに、二次元非定常流解析によって、直接的に氾濫流量ハイドログラフを求める。氾濫量の計算方法は、仮定の氾濫水路の下流端に設けた十分大きい池の堰高を調整し、また本川上下流端の境界条件位置に設けた堰の高さを調節し、破堤による本川洪水流の水面形の時間変化が観測値と計算値で一致するようにする。

この計算法の妥当性を確認するため、常願寺川堤外地の砂州上に長さ 110m、幅 5m、高さ 1.5m の水路を掘削し、ここに最大流量 19m³/s の洪水流を発生させた。図-7 に現地実験水路と観測機器の設置状況を示す。流量観測は、実線で示した破堤点上・下流断面、氾濫水路断面の

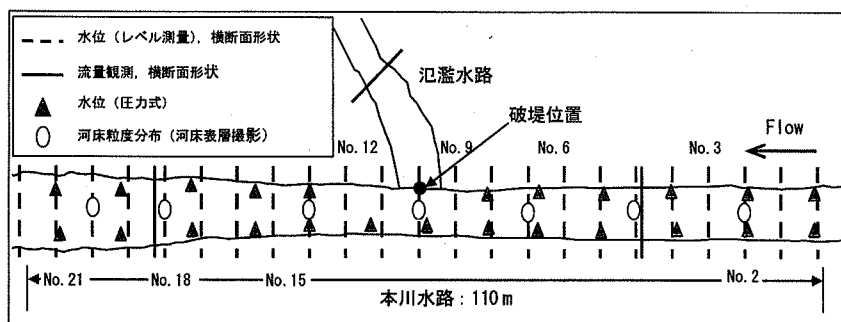


図-7 実験水路平面図

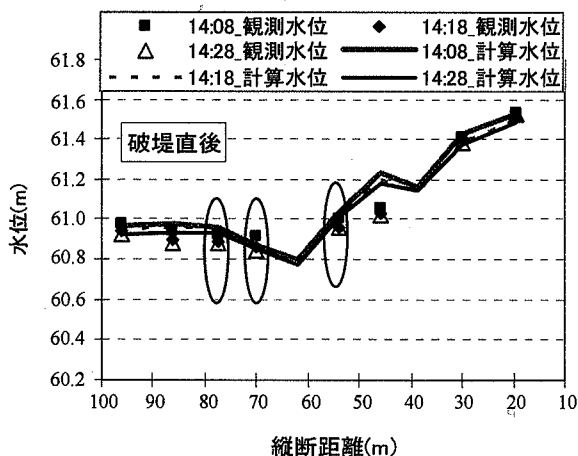


図-8(a) 観測水面形と計算水面形の時間変化

3 断面で実施されている。しかし、氾濫水路では流速観測が 1 測線と河道より測点が少ないために、氾濫流量の観測精度は低い。水位縦断形の時間変化は圧力式水位計での測定と同時に、レベル測量により、破線で示す断面で 5 m 間隔で 15 分毎に測定されている。実験の都合上、水路下流端でせき上げており、下流域の水深は大きく水面勾配は小さい。解析区間は図-7 の No.2~No.19 である。

(2) 解析結果と考察

図-8(a) (b)に破堤直後、流量下降期の観測水位と計算水位の縦断分布の時間変化を示している。丸で囲んだ縦断距離の観測水位と計算水位がほぼ一致するように氾濫流量を求めている。図-9 は、上流側、下流側での観測流量と計算流量の比較を示す。図より、観測流量と計算流量のハイドログラフはほぼ一致している。これより、河道内の実測水面形の時間変化を解とした二次元非定常流解析は、破堤氾濫量の推算に有効であることが明らかとなった。実河川の破堤氾濫量の把握には、ヘリコプター等による河道の水面形の時間変化の写真撮影が必要となる。しっかりとした体制整備が望まれる。

4. おわりに

河川の維持管理の重要性が増大する中で、河川の特性に応じ最低限守るべき維持管理基準の検討が喫緊の課題である。河川工学、水理学の調査・研究成果を活用する河川の維持管理の時代が来た。技術者、研究者が一体となって維持管理を十分に意識した調査・研究及び時代にマッチした技術開発を進めていかなければならない。本論文は、このことを強く意識したものである。

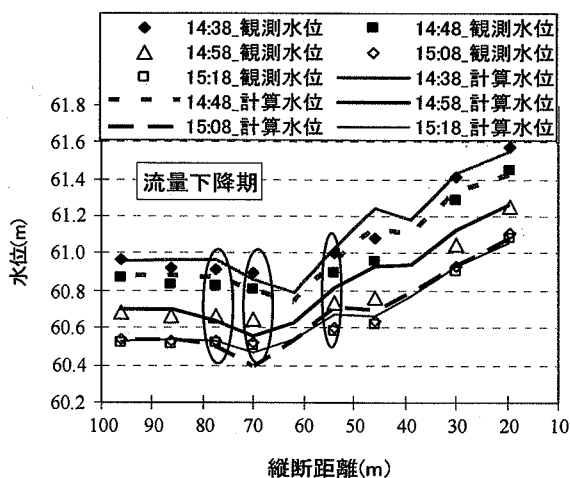


図-8(b) 観測水面形と計算水面形の時間変化

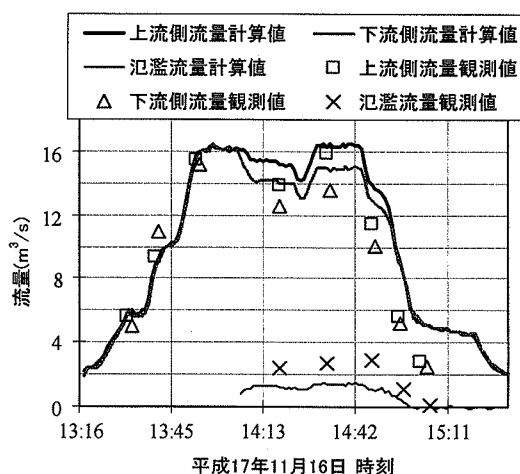


図-9 氾濫流量のハイドログラフ

参考文献

- 1) 総合的な豪雨災害対策の推進について，社会資本整備審議会河川分科会，豪雨災害対策総合政策委員会，平成 17 年
- 2) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005
- 3) 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流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，第 761 号/II-67，pp. 45-56，2004.
- 4) 福岡捷二，永井慎也，佐藤宏明：河川合流部を含む本・支川の流量ハイドログラフ，貯留量の評価—利根川・渡良瀬川の平成 13 年 9 月洪水を例として—，水工学論文集，第 49 卷(1)，pp. 625-630，2005.
- 5) 福岡捷二，渡邊明英，田端幸輔，風間聡，牛腸宏：利根川・江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価，水工学論文集，CD-ROM(50)，2006.
- 6) 福岡捷二，山崎憲人，黒田勇一，井内拓馬，渡邊明英：急流河川の河床変動機構と破堤による氾濫流量算定法の調査研究，河川技術論文集，第 12 巻，2006.

(2006. 4. 6 受付)