

11. 中小河川における水位流量特性

Stage-discharge relation of flood in small and medium-sized rivers

技術支援課 高崎忠勝、大澤健二、湊友洋、杉原大介（現在、二建）

1. はじめに

土木技術支援・人材育成センターでは中小河川において流量観測調査を行っている。流量観測調査は大雨による増水時や降水の影響のない平水時に河川流量を観測し、河川管理や計画に資する基礎的データを得るものである。流量観測調査は主に水位観測所付近で行っており、水位と流量の関係を表す水位流量曲線の作成が調査目的の一つとなっている。東京都内の中小河川には150以上の水位観測所¹⁾が存在しており河川水位を連続して記録している。河川に関する検討において流量を把握したい場合、水位流量曲線によって水位データから流量の算定を行うことが可能である。

中小河川の流量観測において大きな流量を観測するには、強い雨が降る前にこれを予測して現地に行き観測体制を整える必要がある。しかし、強い雨を事前に予測することが難しいため、計画高水規模の水位や流量についてはほとんど観測できていない。水位流量曲線の作成に用いた観測データより大きな水位や流量に水位流量曲線を適用することを外挿といい、計算された水位や流量に大きな誤差を含む可能性がある。しかし、治水上の問題を検討する際には多くの場合、水位流量曲線を外挿することになる。

本報告では、平成22～23年度に石神井川で行った高水流量観測結果をもとに水位流量曲線を作成し、これを外挿した際の影響を検証する。また、検証結果をもとに水位流量曲線の作成方法を考察する。

2. 高水流量観測の結果

石神井川は小平市内に源を發し東京都北部を東に流れ隅田川に合流する荒川水系一級河川である。平成22～23年度に石神井川では山崎橋と加賀橋の2地点で増水時の河川流量を観測する高水流量観測を実施している。2地点の位置を図-1に、観測地点の状況を写真-1に示す。2地点は板橋区内に位置し、山崎橋の近くには大谷口水位観測所、加賀橋の近くには加賀橋水位観測所がある。流量観測は2地点共に橋下流側の断面において橋上から流速計を用いて行ったが、流速が早く流速計の使用が困難な場合のみ浮子を使用している。

高水流量観測時の水位と流量の関係を図-2に示す。山崎橋の観測範囲は水位がA. P. 16. 14～19. 15m、流量が0. 9～168. 9m³/sであり、加賀橋の範囲は水位がA. P. 9. 1～13. 21m、流量は1. 3～149. 4m³/sである。図-2をみると全ての観測データについて水位と流量の関



図-1 観測地点



写真-1 観測地点（上：山崎橋、下：加賀橋）

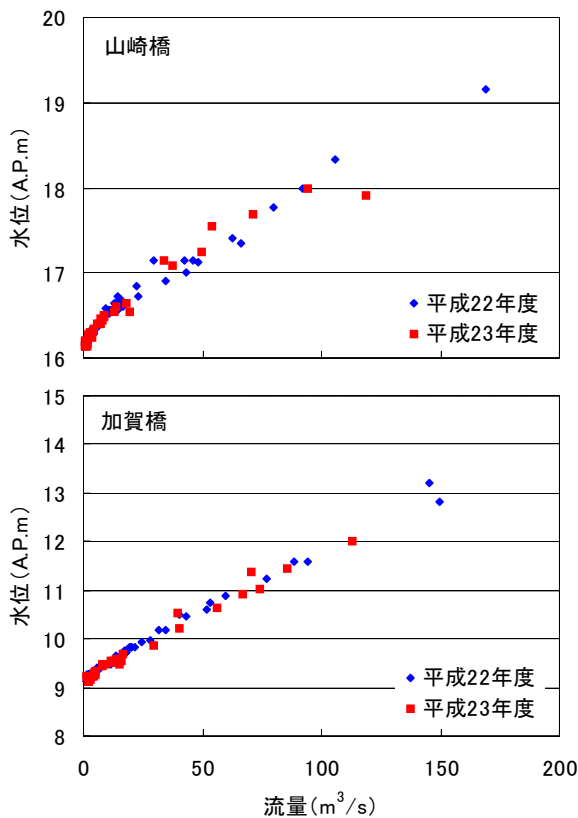


図-2 高水流量観測結果

係が概ね1つの曲線で近似できることから、平成22～23年度に水理特性の大きな変化はないものと判断される。

3. 水位流量曲線の作成

平成22～23年度に石神井川の流量観測で得られた結果を用いて、複数の方法で水位流量曲線を作成し、これを外挿した際の影響を検証する。水位流量曲線の作成方法は、流量の平方根と水位の関係に基づく一般的な方法（ケース1）、 Manning式を用いた方法（ケース2）、断面内の粗度係数の違いを考慮する方法（ケース3）の3種類とする。

以下に検証作業の手順を示す。1) 各地点の観測流量データについて最大観測流量に対して50%未満の流量データを水位流量曲線作成に使用するデータ（作業データ）とし、最大観測流量の50%以上の流量データは検証に用いるデータ（検証データ）とする。2) 作業データのみを用いて水位流量曲線(a)を作成する。3) 作成した水位流量曲線を外挿し検証データと比較する。4) 作業データに検証データを加えた全てのデータを用いて水位流量曲線(b)を作成する。5) 作業データによる水位流量曲線(a)と全データによる水位流量曲線(b)を比較する。

(1) 流量の平方根と水位の関係に基づく方法

一般的な水位流量曲線の作成方法は流量の平方根と水位の関係を一次式で近似し、これを式(1)の形に変形し水位流量曲線として表すものである。

$$Q = a \times (H + b)^2 \quad (1)$$

ここに、 Q ：流量 (m³/s)、 H ：水位 (m)、 a 、 b ：定数

これまで中小河川で行った流量観測の報告書に記されている水位流量曲線はこの方法によって作成されている。この方法は観測流量の範囲内であれば比較的妥当な値を得ることができ、水位流量曲線を簡単に作成でき、また、作成された水位流量曲線は利用が容易であるといった特長がある。

図-3に2地点の流量の平方根と水位の関係を示す。図中の線(a)は作業データのみを用いて最小自乗法によって作成した一次式であり、線(b)は全てのデータを用いて作成した一次式である。それぞれの式を式(1)の形に変形し、縦軸を水位、横軸を流量として表すと図-4に示す水位流量曲線（ケース1）となる。

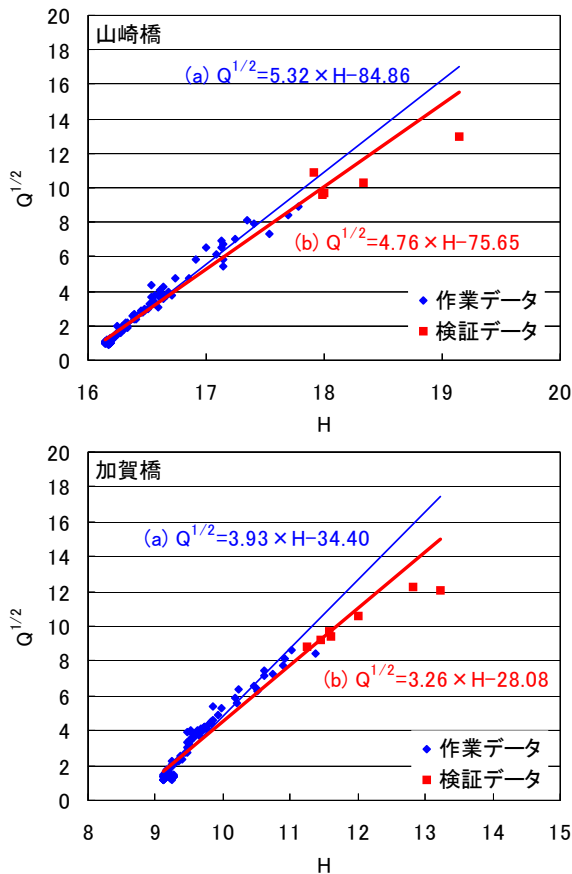


図-3 流量の平方根と水位の関係

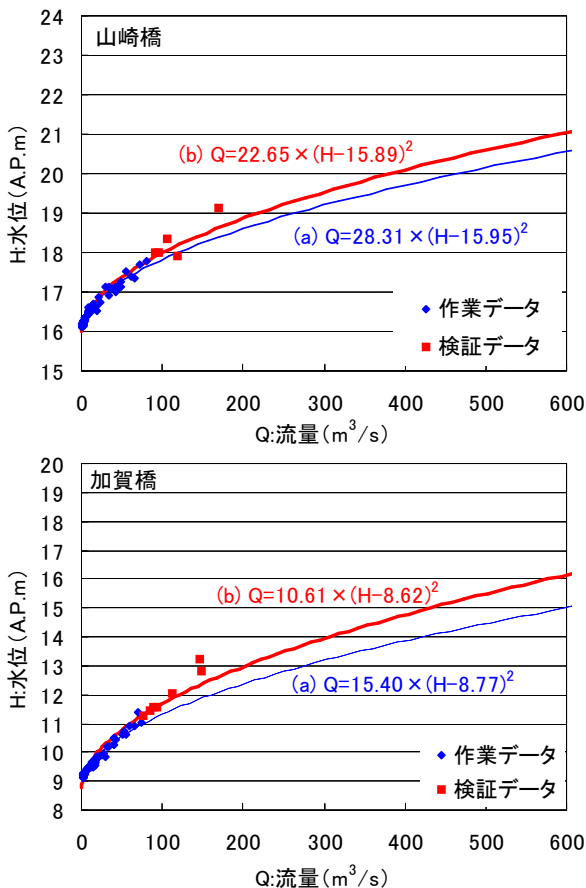


図-4 水位流量曲線 (ケース1)

図-3および図-4において作業データから作成した式(a)は、作業データの水位と流量の関係を概ね表している。しかし、細かく見ると作業データの範囲内であっても作業データの最小値および最大値付近では流量を過大（水位を過小）に評価し、最小値と最大値の中間程度のデータについては流量を過小（水位を過大）に評価している。作業データより水位や流量が大きい検証データの範囲では、この傾向がさらに大きく現れる。全データを用いた式(b)は、作業データから作成した式(a)と比べて検証データの範囲の誤差は小さくなっているが流量を過大（水位を過小）に評価する傾向は式(a)と同様にみられ、特に最大の観測値に対して大きな誤差を生じている。

(2) マニング式を用いる方法

水位流量曲線を外挿する場合、水位流量曲線を単純に延長すると観測されていない範囲の断面形状を考慮できないので断面特性を考慮した水位流量曲線を作成することが望ましい²⁾。ここではマニング式を用いて断面特性に基づく水位流量曲線を作成する。

等流を想定した場合、流量 Q (m³/s) は式(2)で表される。

$$Q = A \times \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times I^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 R : 径深 (m)、 A : 面積 (m²)、 n : 粗度係数、 I : 勾配

断面形状から水位 H に対応する面積 A および径深 R を計算できるので、式(2)において $I^{1/2}/n$ の値が一定であると仮定すれば、観測水位と観測流量から $I^{1/2}/n$ の値を求めることで水位流量曲線を作成することができる。

図-5に観測流量と観測水位に対応する $AR^{2/3}$ の関係を示す。図中の線(a)は作業データに対する切片0の一次式であり、線(b)は全データに対するものである。また、図において一次式の傾きが $I^{1/2}/n$ に該当する。図をみると流量と $AR^{2/3}$ の関係は概ね一次式で近似できるものの流量が大きくなると $AR^{2/3}$ に対応する流量が小さくなる傾向がみられる。流量と $AR^{2/3}$ の関係を検討する際に使用するデータの観測範囲によって流量と $AR^{2/3}$ の関係式が変化し、大きな観測データ

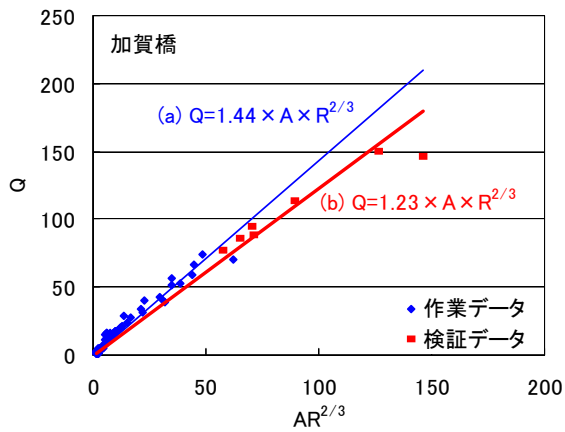
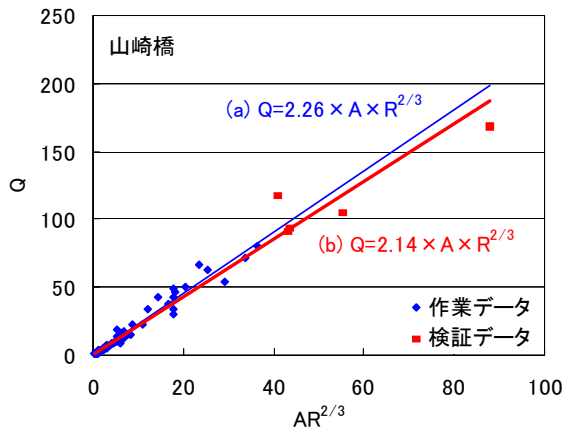


図-5 流量と断面特性の関係

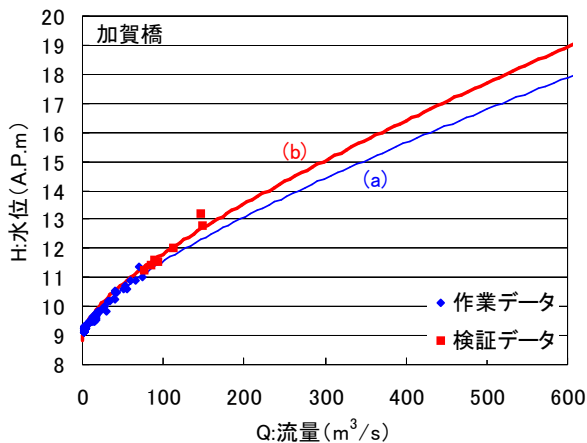
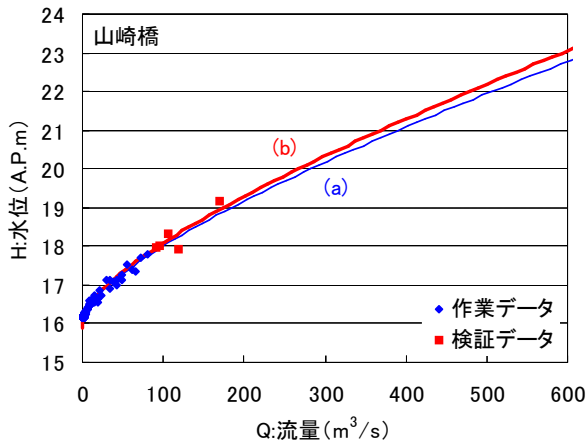


図-6 水位流量曲線 (ケース 2)

を用いるほど一次式の傾き $I^{1/2}/n$ が小さく算出される。

図-6に Manning 式による水位流量曲線(ケース 2)を示す。水位流量曲線は水位を変化させながら水位に対応する面積と径深を求め、図-5に示した式を用いて流量を算出することによって作成した。図-6の水位流量曲線は作成に使用したデータの水位と流量の関係を良好に表現しており、ケース 1 と比較すると大きな水位の範囲では流量を小さく算出する。また、ケース 1 は観測水位の最大値に対する流量を大幅に過大に算出していたがケース 2 では過大の程度が小さく抑えられている。

(3) 断面内の粗度係数の違いを考慮する方法

ケース 2 は図-5から大きな水位に対して流量を過大に評価する傾向がある。この原因は式(2)において $I^{1/2}/n$ の値を一定としている点にあり、実現象は水位に応じて粗度係数や勾配が変化するものと考えられる。そこで、断面内の粗度係数の違いを考慮した水位流量曲線の作成を試みる。河床と護岸の材料が異なる場合には護岸の粗度係数が一定であっても断面全体の粗度係数は水位によって変化する。潤辺の粗度係数が異なる断面の流速は式(3)で表される。

$$V = \frac{A^{2/3}}{\left(\sum S_i \times n_i^{3/2}\right)^{2/3}} \times I^{1/2} \quad (3)$$

ここに、 n_i : i 番目の粗度係数、 S_i : i 番目の粗度係数を有する潤辺 (m)

観測値に対して誤差を最も小さく算出できる勾配、河床の粗度係数および護岸の粗度係数の組み合わせを探索する。なお、最適な組み合わせが多数存在するため個々の値を決定することはできないが、水位と流量の関係を求めることは可能である。今回は SC E-UA法によって探索した。探索によって得られた値を用いて式(3)によって計算した流速および $Q/AR^{2/3}$ の値を観測値から逆算したものと共に図-7に示す。図に示した $Q/AR^{2/3}$ は図-5における一次式の傾き $I^{1/2}/n$ に相当する。加賀橋の観測値は水位上昇による流速の変化を明確に捉えており、作業データから作成した式(a)と全データを用いた式(b)は観測値の流速変化を良好に表している。 $Q/AR^{2/3}$ については河床付近の水位で観測値がばらつくものの水位が高くなる

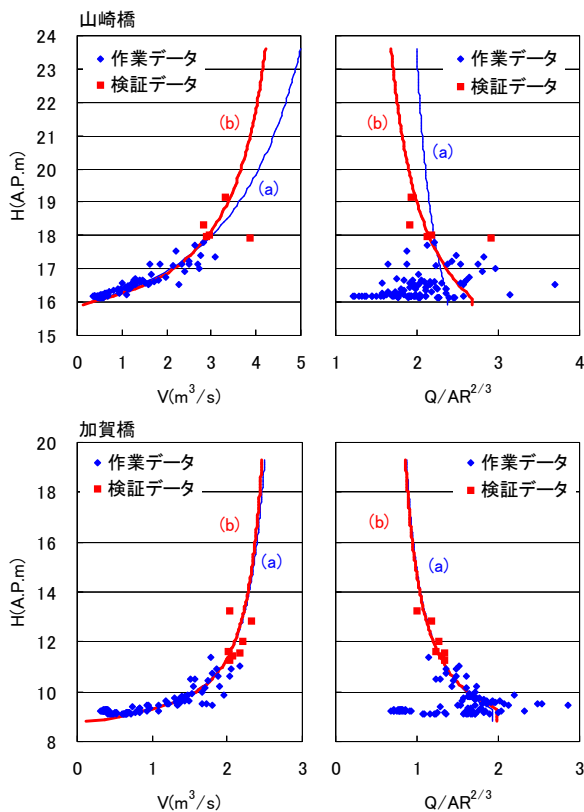


図-7 水位と流速および $Q/AR^{2/3}$ の関係

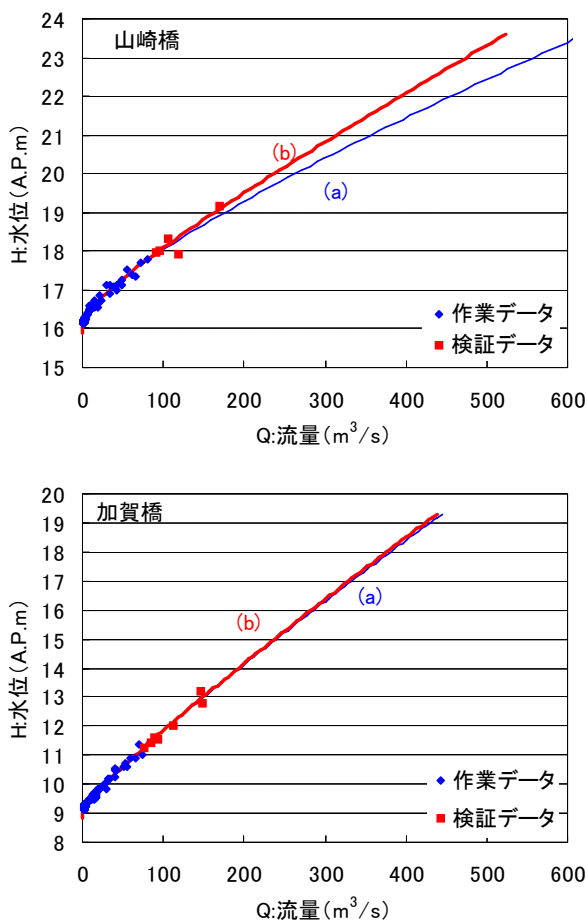


図-8 水位流量曲線 (ケース3)

と一意の関係を示し、計算値はこの関係を良好に表している。一方、山崎橋の観測値は水位上昇による流速の変化を十分には捉えられていないため、作業データから作成した式(a)と全データを用いた式(b)に違いがみられる。精度の良い外挿を行う上で、観測値が水位上昇による流速変化を十分に捉えておくことが望ましい。

図-8に断面内の粗度係数の違いを考慮した水位流量曲線(ケース3)を示す。水位流量曲線は水位を変化させながら流量を式(3)によって算出し作成した。最大値を含む全ての観測データに対して水位と流量の関係を適切に表現しており、外挿の範囲ではケース2と比べて流量を小さく算出する。

4. 既往洪水の流量計算

3種類の水位流量曲線を用いて既往洪水の流量を計算し、水位流量曲線の違いが実際の流量計算時に及ぼす影響を検証する。対象洪水は平成22年12月3日(洪水1)と平成22年7月5日(洪水2)の2つの洪水である。洪水1は高水流量観測を行った洪水であり、観測範囲内の適用に対する検証を目的とし、洪水2は平成22年に最大の流量が発生した洪水であり、外挿に対する検証を目的とする。

まず、対象洪水の水位を東京都水防災総合システムの水位データから求める。平成22年度の流量観測時に観測された水位と最寄り水位観測所の水位データの関係を図-9に示す。山崎橋地点の水位(A.P.m)は大谷口観測所の水位データに14.83mを加えることで求められ、加賀橋地点では加賀橋観測所のデータに8.99mを加えることで求めることができる。なお、大谷口観測所は平成23年度に移設されており、前述

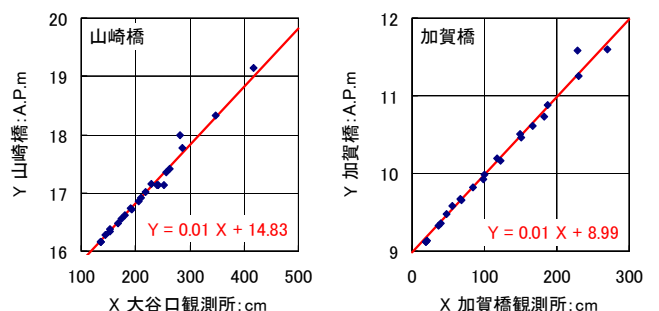


図-9 観測水位と水位データの関係

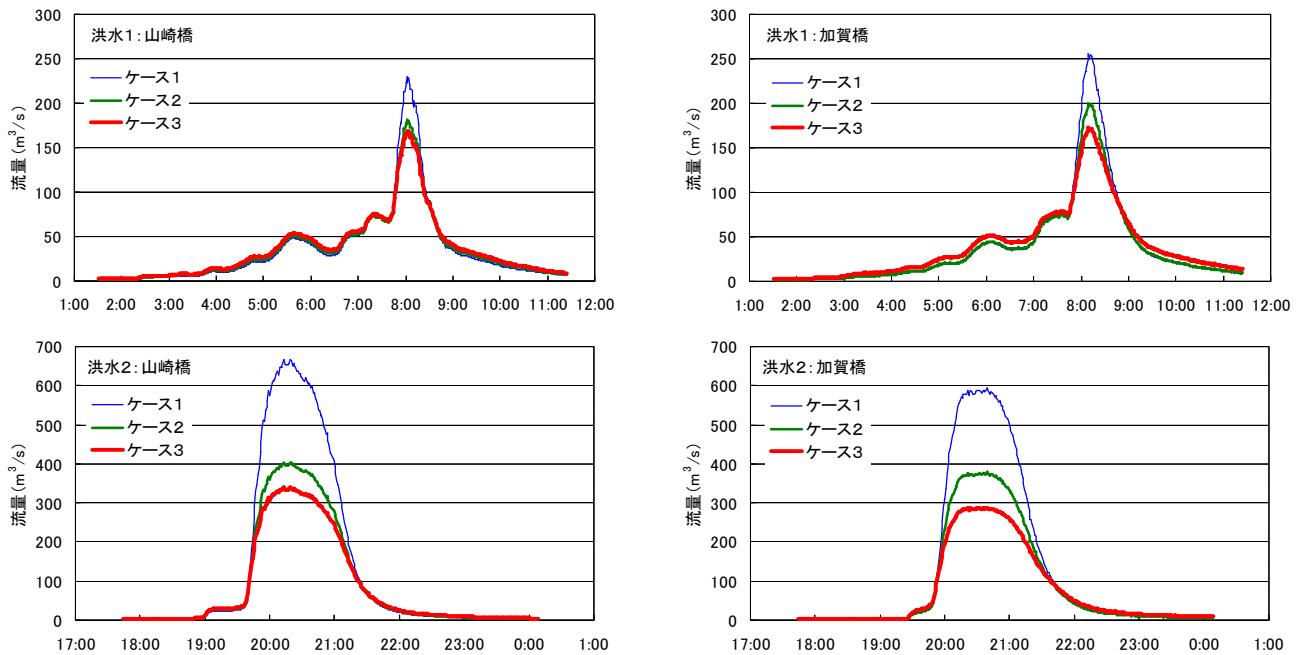


図-10 2洪水のハイドログラフ

した値は移設後の水位データには適用できない。

次に、ケース1～3において全てのデータを用いて作成した水位流量曲線(b)を用いて流量を計算する。図-10に2洪水のハイドログラフを示す。水位流量曲線の違いはピーク流量に大きく現れ、洪水1のピーク流量についてケース1とケース3の違いをみると山崎橋が $62\text{m}^3/\text{s}$ 、加賀橋では $84\text{m}^3/\text{s}$ の差が生じている。ケース3の水位流量曲線は洪水1のピーク水位付近の流量を良好に評価し、他の水位流量曲線は過大に評価していることから、ケース1と2についてはケース3との差だけ流量を過大に計算していると考えられる。ピーク流量のケース1とケース3の差について洪水2を見ると山崎橋が $327\text{m}^3/\text{s}$ 、加賀橋が $307\text{m}^3/\text{s}$ のように大きな差となっている。いずれのケースについても水位流量曲線を外挿することによって計算流量にはある程度の誤差を含んでいる。しかし、ケース1のピーク流量は他の2ケースと

比べて極端に大きく、かつ、計画流量³⁾を大きく上回るものとなっており、過大に計算されたものと判断される。ケース1と比べてケース2やケース3は流量を適切に計算していると考えられる。

5. まとめ

平成22～23年度に石神井川で行った高水流量観測結果をもとに水位流量曲線の外挿に対する検討を行い以下のことを確認した。一般的な方法で作成した水位流量曲線は外挿時に極めて大きな誤差を生じる。マニング式を用いる方法は、比較的容易に水位流量曲線を作成することができ、外挿に対しても極端に大きな誤差を生じにくいので、今後の流量観測調査等で活用を図っていききたい。また、断面内の粗度係数の違いを考慮する方法については今回の検討においては良好な結果を得られたが、今後、他の事例に対して適用性を検証していききたいと考えている。

参考文献

- 1) 東京都(2012)：東京都水防計画
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局(2012)：河川砂防技術基準調査編、第2章、第4節
- 3) 東京都(2006)：荒川水系石神井川河川整備計画、p11