

緩流河川におけるループを伴う水位流量関係の 再現と推定について

北海学園大学 工学部 社会環境工学科 許 士 達 広
北海学園大学 工学部 相 原 綾 太
北海学園大学 工学部 堀 内 赳 志

緩流河川におけるループを伴う水位流量関係の 再現と推定について

Reproduction and Estimation of Loop-Curve between Water Level and Discharge in Low Gradient Rivers

許士 達広¹・相原 綾太²・堀内 赳志³

Tatsuhiko KYOSHI, Ryouta AIHARA, and Takeshi HORIUCHI

¹北海学園大学 工学部 社会環境工学科 教授

²北海学園大学 工学部

³北海学園大学 工学部

要 旨

緩流河川において洪水時の水位流量関係（H-Qカーブ）はループを描き、通常用いられる1本の水位流量曲線で水位から流量を推定すると、大きな誤差を生じることがある。また1洪水あたりの流量の測定回数も限られるため、観測データのみからのループの推定は難しい。これに対処するため、本研究では石狩川において洪水時に短時間の間隔で流量観測されたデータを用い、水位変化から流量ループを再現することを試みた。実測の流量と水位上昇速度を考慮して、水面勾配や河道の粗度を推定した結果、一定のループの再現を得ることができた。また少ない流量観測でも、既往の複数の洪水の水位と粗度の関係を合成することでループの再現が可能かどうか検討した結果、既往洪水と河道条件が近い場合には、良好な結果が得られる可能性があることが分かった。

《キーワード：水位流量曲線；ループ補正；水位上昇速度；粗度》

1. はじめに

河川管理において、水位計で観測される水位を流量に換算するために、流量観測時の水位と流量の関係から水位流量曲線(H-Q曲線)が描かれている。緩勾配の河川下流部において洪水時に流量観測すると、通常は水位を縦軸、流量を横軸にとった場合反時計回りのループを描く。ループを描くのは水位上昇期と下降期で水面勾配が違うため、同じ水位の流量に差が生じていることによるが、流量観測には観測体制や予算の制限があり、一つの洪水でループが描けるような多くの高水流量観測を行うことは難しい。したがって各時点の流量は、通常流量と同様に、年間の流量観測データを用いて定めた一価性の水位流量曲線により水位から算出されており、このため洪水時にはH-Q曲線の流量と実際の流量との間で、図-1に示すような河川管理上無視できない大きな誤差が生じることがある。ここでは問題の解決のために、既往の洪水時の資料から水位と粗度係数の関係を推定し、水位上昇速度を用いて水面勾配を算出して、水位上昇期と下降期の流量ループを描く方法を検討する。

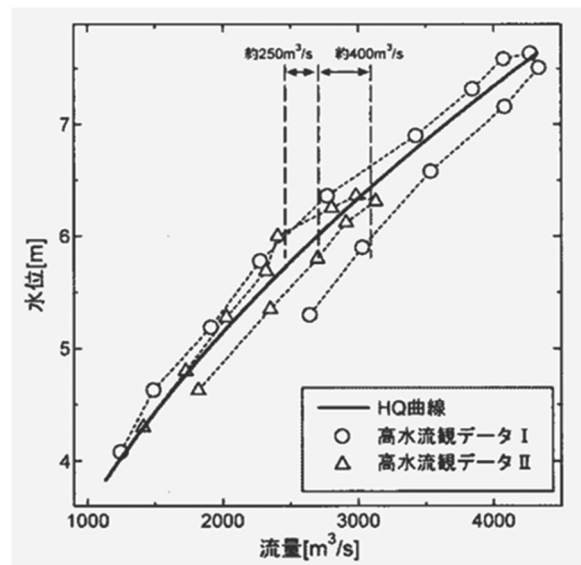


図 - 1洪水時におけるH-Q曲線のループ
(参考文献2 p I_1358 より転載)

2. 従来の流量補正の問題点

従来から上記の問題点を解消するために、流速に Manning 則を用いて、水位流量曲線に定常状態と流量観測時点の水面勾配比による補正を加える方法が提案されている。^{1) 2) 3) 4)} 実測および仮定の定常状態の添え字を a 、 m 、流量 Q 、水面勾配を I とすると、定常状態を示す仮定流量 Q_m は実測の流量 Q_a に対し

$$Q_m = Q_a \sqrt{I_m / I_a} \quad (1)$$

で表され、これを H-Q 式に用いる。逆に水位から流量を求めるときには、次式により算定する。

$$Q_a = Q_m \sqrt{I_a / I_m} \quad (2)$$

しかしこの勾配による H-Q 曲線の補正には実用上の問題がある。実測の水面勾配 I_a は河川砂防技術基準では近隣の水位観測所との水位差による勾配が現実的としているが、水位観測所間の距離が一定以上になれば河床勾配の違い、河道断面の変化、支川の流入、落差工の存在などにより水位観測所間の水位差からは、正しい水面勾配は求められない。また仮定勾配 I_m は、河川砂防技術基準では地点間の計画高水位の勾配を用いることが示されているが、計画高水位は過去の複数の洪水実績や流出解析で出されたピーク水位を繋いだものであるから、それが各洪水の定常的な水面勾配になるとは限らず、実際にはこの修正方法はほとんど用いられていない。なお洪水時の流量観測時に水面勾配を測定しているが、浮子の流下速度を測定する断面間の距離が短いことや、波浪による水位変動などにより精度に問題があることが知られており、補正のためには使われていないのが現状である。

3. 流量推定の考え方

ここでは以上の状況を踏まえ、河川水位と限られた流量観測から粗度と水面勾配を推定し、洪水時の水位流量曲線のループを描く手法を検討する。ここでは最もシンプルに kinematic wave モデルで Manning

グ則が成立するとして計算する。

(1) 流量観測時の水面勾配と粗度の推定式

水位観測地点において洪水時の水面勾配 I は一般に以下のように表される。^{2) 3) 4) 5) 6) 7)}

$$I = I_B + \frac{1}{\omega} \frac{\partial H}{\partial t} \quad I_B : \text{初期水面勾配} \quad \omega : \text{洪水伝播速度} \quad (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} : \text{水位変化速度} \quad t : \text{時間(秒)} \quad H : \text{水深(m)}$$

水位観測所において通常は自記水位計による水位のみが観測されており、水面勾配は求めることができない。しかし水位変化 $\partial H / \partial t$ は算出ができるため、 I_B や ω を推定すれば、(3) 式により各時点の水面勾配 I を求めることができる。洪水時に流量観測がされている場合 観測時間 Δt の平均として流速 V が測定される。その間の水位上昇 ΔH とすれば水位変化速度 $\partial H / \partial t$ は $\Delta H / \Delta t$ である。(3) 式から求めた水面勾配 I を用いてそのときの粗度 n は

$$n = \frac{I}{V} \times R^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}} \quad V : \text{流速実測値} \quad R : \text{径深} \quad (4)$$

で求めることができる。

(2) 流量の再現及びパラメータの最適化

上記の方法により各流量観測時点で粗度を算出し、水位と粗度の関係式 ($H-n$ 式) を求める。また、河道断面図から洪水ごとの水位と径深 ($H-R$)、水位と河道断面積 ($H-A$) の関係式も求めておく。水位と粗度、水位と径深、水位と断面積の関係式が求まれば、逆に任意の時点の水位と水位上昇速度から水面勾配および流量を再現できる。河道断面を幅広長方形に近似すれば、単断面の時は以下の (5)、(6) 式、複断面の時は (7)、(8) 式で水面勾配 I と流量 Q は求められる。(7) 式は断面変化による水位上昇速度の急激な変化等に対応するものである。(5)、(7) 式の両辺に I が含まれるため、 I はトライアル計算で求まる。

$$I = I_B + \frac{1}{\frac{5}{3} \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}} \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$I = I_B + \frac{1}{\frac{5}{3} \left(\frac{B_1 \frac{1}{n_1} R_1^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} + B_2 \frac{1}{n_2} R_2^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} + B_3 \frac{1}{n_3} R_3^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \right)}{(B_1 + B_2 + B_3)}} \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (7)$$

$$Q = B_1 \frac{1}{n_1} R_1^{\frac{2}{3}} I_1^{\frac{1}{2}} + B_2 \frac{1}{n_2} R_2^{\frac{2}{3}} I_2^{\frac{1}{2}} + B_3 \frac{1}{n_3} R_3^{\frac{2}{3}} I_3^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

さらに I_B と ω 、 $H-n$ 関係式といったパラメータを変化させて流量を求め、(9)式で計算される流量と実測流量の誤差の2乗和 E が最小になるときを最適な再現として各パラメータを決定する。

$$E = \sum (Q_{\text{実測}} - Q_{\text{計算}})^2 \quad (9)$$

(3) 初期水面勾配 I_B

(3), (5), (7) 式の I_B は一般には河床勾配とされる。しかし河床勾配は通常図-2のように局所的な変化が大きく、水面と逆勾配になることもあり、洪水時前の水面勾配としては妥当でない場合がある。このため当該年度の平常時（洪水時及び冬季観測以外）の水面勾配の平均を I_B の初期値として、計算される再現流量が実測値に近いループを描くようトライアルで定める。このようにして定めた I_B は物理的定数より一つのモデルパラメータとしての意味が大きくなる。なお I_B には洪水時の時間変化はないものとする。

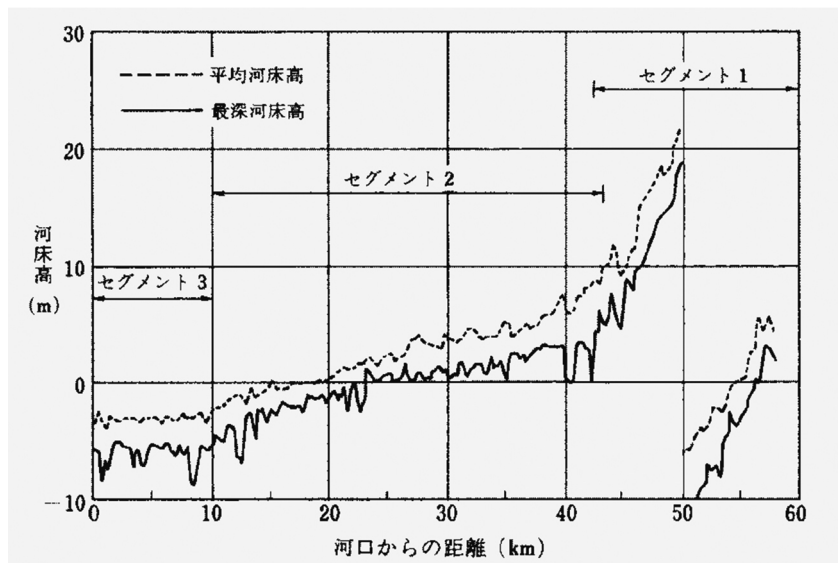


図-2 河道縦断面図（河川工学 鮭川登他1992年 鹿島出版 P107より転載）

(4) 洪水伝播速度 ω

洪水伝播速度 ω はマニングの平均流速 V に対し、クライツ・セドンの法則^{5) 6) 7)}により広幅長方形断面では $\omega = 5V/3$ ，広幅放物線形断面では $\omega = 13V/9$ ，三角形断面では $\omega = 4V/3$ で表される。また

$$\omega = dQ/dA \quad Q: \text{流量} \quad A: \text{河道断面積} \quad (10)$$

であることから、実際の河道断面データから水位流量曲線（ $H-Q$ 曲線）や水位河道断面積曲線（ $H-A$ 曲線）を用いて Q と A の勾配として推定することも考えられる。

図-3は後述する石狩川の岩見沢大橋における2011年9月洪水、及び月形観測所における2005年9月洪水の流量と河道断面積（ $Q-A$ ）関係の図である。 ω は図の勾配であるので線の傾きの小さな違いが ω 値に影響する。樹木により流速が低減するため、折れ線近似にしたほうが当てはまる場合があるが、流量を再現するとき不連続になる傾向があり、ここでは直線をあてはめて、洪水ごとに一つの ω にしている。

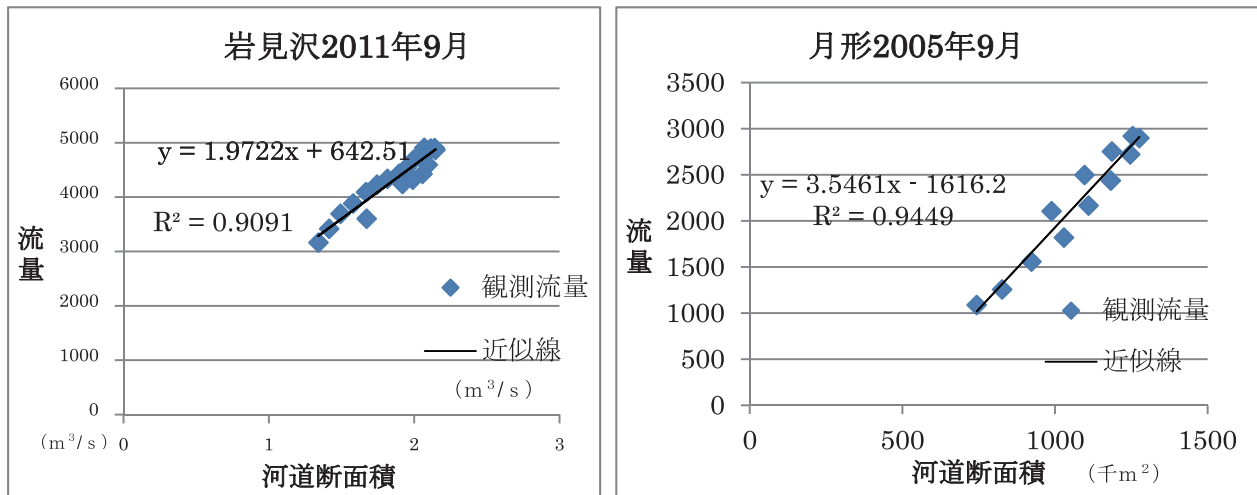


図 - 3 流量—河道断面積関係図

河道断面から求まる両観測所における6つの洪水の ω は表-1に示すとおりであり、平均3.38m/s程度である。観測された流速 V を用い $\omega = \alpha V$ とすると、洪水により差があるが平均の α は1.63程度となり $5/3 \div 1.67$ と大差がない。(3)式における ω と I_b は補完的な関係があり、 I_b が大きいときには I が大きく、 ω が大きければ I は小さい。どちらを変化させても一定のループの同定が可能であるが、6つの洪水の α の平均が $5/3$ に近いことから、ここでは(5)、(7)式に示すように $\omega = 5/3V$ に固定して進めることとする。

表 - 1 洪水伝播速度 (m/s)

年	月	場所	dQ/dA		5/3V	
			ω	α	ω	α
2005	8	月形	3.476	1.703	3.542	1.667
2005	9	月形	3.546	1.822	3.328	
2011	9	月形	2.480	0.989	4.187	
2005	8	岩見沢	4.634	2.147	3.787	
2005	9	岩見沢	4.174	2.122	3.340	
2011	9	岩見沢	1.972	0.993	3.934	
平均			3.380	1.629	3.686	1.667

(5) 粗度 n

流量再現のため河道の粗度は前述したように(3)、(4)式で水位 H ごとに計算される。河畔林が存在する場所は境界混合係数とすることも考えられるが、データの精度からここでは粗度に含めて扱った。 I_b を変化させ、仮定する I_b 毎に $H-n$ の関係が算出される。 $H-n$ 関係に直線または折れ線の式をあてはめ、それを用いて(5)～(8)式で流量を再現した時に(9)式が最小になるように、 $H-n$ 関係式と I_b の組み合わせを定める。観測した洪水自体の再現のためであれば、 $H-n$ 式は高次の曲線の方が良いが、ここでは観測数の少ない他の洪水に適用して再現することをもう一つの目的とするため、回帰の傾向を表す直線を主に $H-n$ の近似線とした。物理的意味を優先すれば $H-n$ を先に固定することが考えられるが、両方同時に定めた方が容易にループを得ることができる。この場合 $H-n$ の関係は、 I_b との組み合わせでループを合わせるように算出されるため、実際の物理的なものとは少し異なっていると考えられる。

4. 洪水毎の流量ループの再現

(1) 観測所と対象洪水

今回の検討には石狩川本流の岩見沢大橋観測所、月形観測所において、ほぼ1時間単位で流量が計測されている2005年8月、2005年9月、2011年9月の各洪水を用いた。^{8) 9)} これらの観測所付近においては、河床勾配が1/4000程度と緩流であるため洪水時にループを描く。2つの観測所の河道断面は図に示すようであり、岩見沢大橋では水位が高い2011年9月は図の①～⑥の河道部分と⑦の中水敷を分けた複断面計算となる。また写真で示すように両岸や中水敷き部分に河畔林が存在し、流れに影響している。

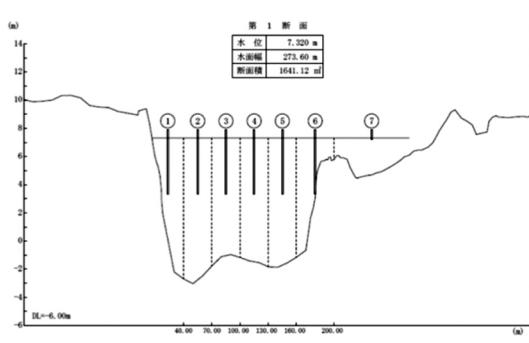


図 - 4 岩見沢大橋河道断面

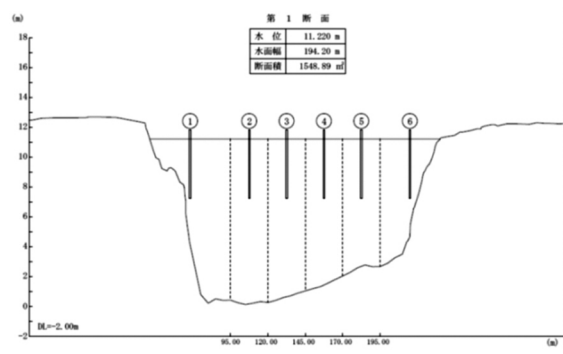


図 - 5 月形河道断面



図 - 6 岩見沢大橋付近写真



図 - 7 月形付近写真

(2) 洪水ループの再現

各洪水におけるH-nの関係及びその時の実測データと流量再現データの関係を図8～19に示す。I_Bを初期値から0.1倍単位で変動させて最適なものを選んでいる。水位の単位はm、流量はm³/sである。

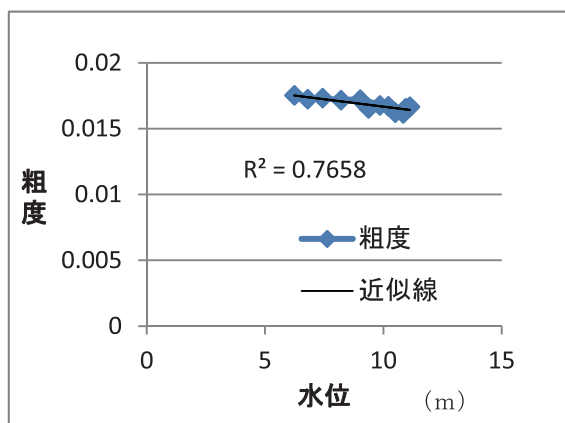


図 - 8 月形2005年8月水位 - 粗度

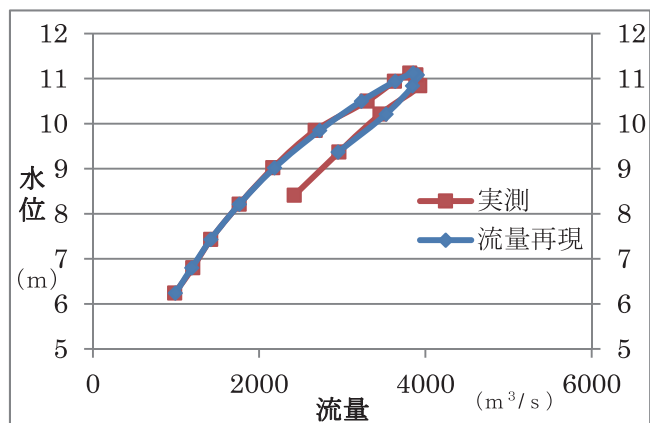


図 - 9 月形2005年8月水位 - 流量再現

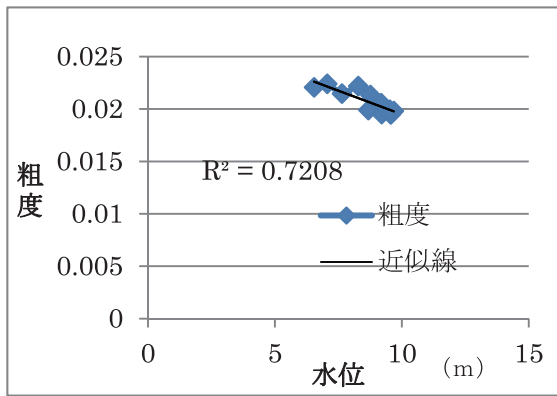


図 - 10 月形2005年9月水位 - 粗度

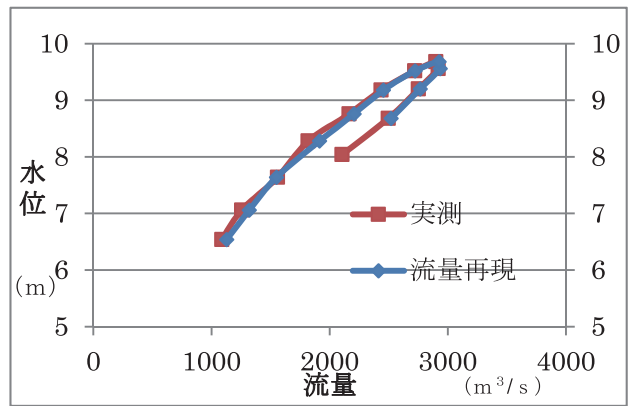


図 - 11 月形2005年9月水位 - 流量再現

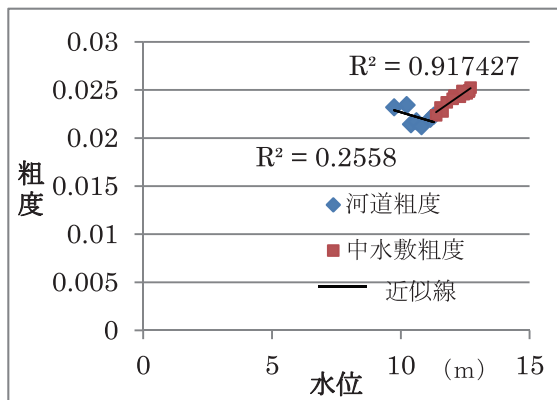


図 - 12 月形2011年9月水位 - 粗度

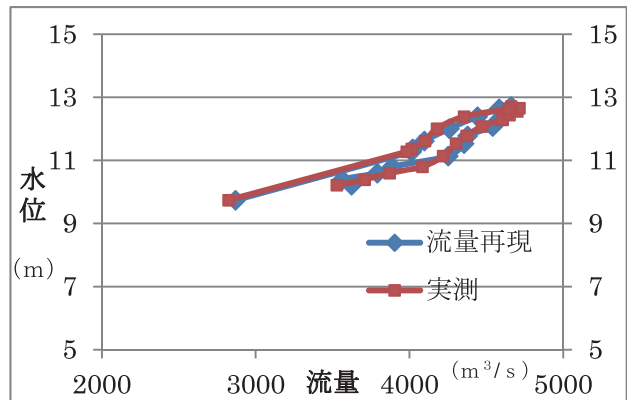


図 - 13 月形2011年9月水位 - 流量再現

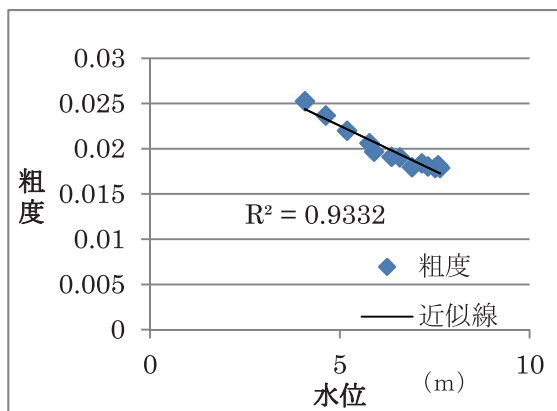


図 - 14 岩見沢2005年8月水位 - 粗度

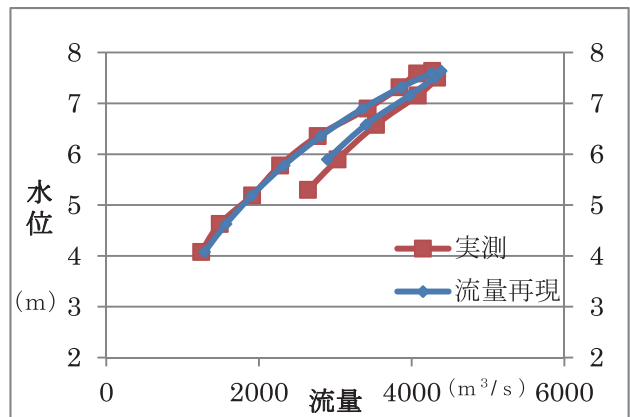


図 - 15 岩見沢2005年8月水位 - 流量再現

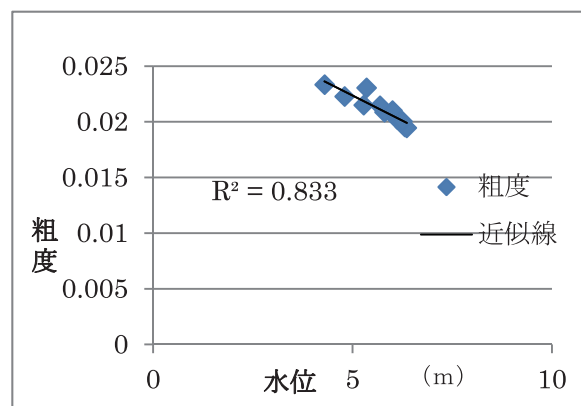


図 - 16 岩見沢2005年9月水位 - 粗度

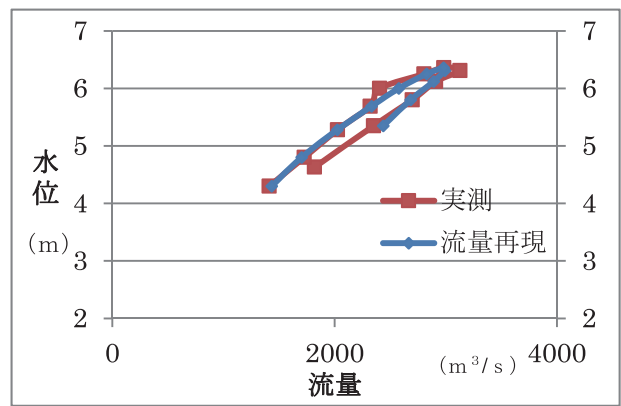


図 - 17 岩見沢2005年9月水位 - 流量再現

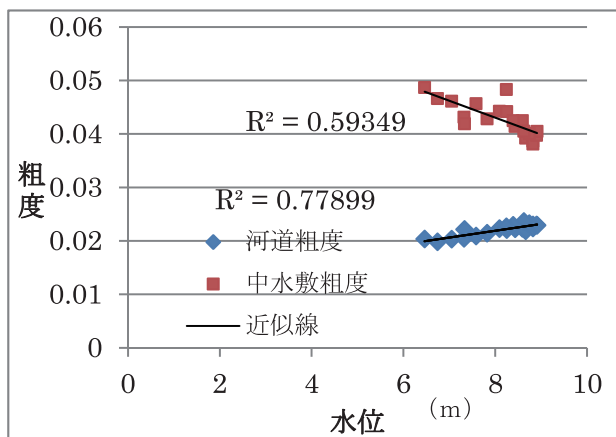


図 - 18 岩見沢2005年11月水位 - 粗度

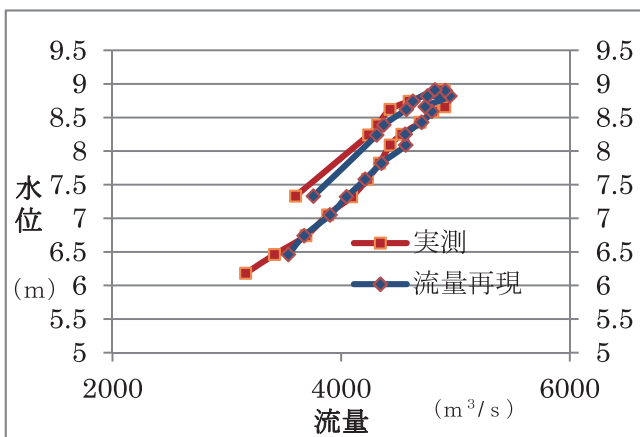


図 - 19 岩見沢2005年11月水位 - 流量再現

以上に示されるように、いずれの洪水もかなり良好にループが再現されている。なお2011年9月については洪水水位が高くなると岩見沢大橋は中水敷、月形は高水敷付近に水位が上がり、そこが樹林帯となっている。水位と粗度の関係が標高により変化していると考えられるため、月形ではH-n関係に折れ線を用いた。また岩見沢大橋は中水敷で流速が大幅に低下するため別の粗度としている。岩見沢大橋は河床部と中水敷に同じ水位で重複して粗度を設定しているが、中水敷の中央部が河岸側より、かなり低くなっているためである。

5. 洪水観測が少ない場合の流量ループの推定

(1) 検討方法

実際の洪水時の流量観測では、観測地点間の距離、観測必要時間に対し、予算と人員の制限から一つの洪水において3~4点（水位上昇期、水位ピーク付近、水位下降期）の観測しか無いことが多い。したがって水位と流量の関係がループを描く場合は、観測点間を補間する流量推定はむずかしいと考えられている。

ここでは同じ観測地点における既往の1回あたりの観測点数の少ない洪水をいくつか合成してH-n関係を定めることにより、個々の洪水のループがどの程度再現できるかを検討した。これが可能であれば、通常の少ない洪水時の観測であっても一定の精度で流量ループが再現でき、ピーク付近の流量が観測されない場合などにも、流量ループを考えたピーク流量推定も可能となる。

例えば同一の観測所で、観測時期が近く河道変化の少ない3つの洪水A、B、Cでそれぞれ3~4回の流量観測がされている場合、これらの観測データをまとめてH-Qカーブを作成し、各洪水の時間流量ループを再現してみる。具体的には I_b を仮定してA洪水の上昇期、ピーク付近、下降期に観測された4点の実測に対し(3)、(4)式により観測時水位に対する粗度を算定する。同じ I_b に対し同様にB洪水、C洪水の観測時水位に対応する粗度を算定し、3つの洪水の水位と粗度の関係を合成してH-n式を作り、流量を再現する。 I_b を変えて同じ作業を行い、それぞれの再現流量による(9)式のE値が最小になる I_b およびH-n式の組み合わせを定める。例えばA洪水を再現する場合は、定めた3洪水合成のH-n式とA洪水におけるH-R、H-A曲線を用いて、(5)、(6)または(7)、(8)式でA洪水の実測4点に対しE値が最小になるものを選択する。

また3つの洪水の発生時期が何年も離れていて河道条件が大きく異なる場合には、H-n式を3つの洪水で合成するのが良いのか、河道条件に近い2つの洪水で合成するのが良いのか、一つの洪水のみで決め

ざるを得ないのか、同様に2洪水合成と単独の洪水の場合を計算して比較する必要がある。

(2) 合成洪水を変えた場合の再現

石狩川の岩見沢大橋、月形の2観測所の洪水時における水位、水位上昇速度、流速の実測値を個別の洪水から3~4点ずつ抽出して検討した。具体的には水位上昇期、ピーク付近、下降期の実測データを2005年8月洪水から4点、2005年9月洪水から3点、2011年9月洪水から4点を選んで、観測所ごとに3洪水11点のH-n合成で流量再現を行った。また2005年8月と9月の2洪水7点の合成H-n、さらに各年1洪水から選んだ3~4点のデータのみによるH-nを計算し、洪水流量を再現して比較した。ここでは月形観測所の結果を示す。なおここでは1洪水あたり3~4点の少ない抽出データから実際の他のデータを補完できるか、おおよその傾向を見るという観点で、H-n関係は傾向を示す直線近似のみで比較した。

i) 2005年8月 月形

以下の図は水位と粗度、水位と再現流量を示す。各洪水の流量再現図において ■ は実測値であるが、このうち各洪水のH-nおよびE値算定に使われるものは ■ で示している。■ は流量再現値であり1時間単位で計算している。図-20は3洪水からの11点の合成H-nであり、図-22は2005年の2洪水から抽出した7点の合成H-n式、図-24は2005年8月洪水からの4点によるH-n式である。図-21, 23, 25はそれぞれによる2005年8月の単独あるいは合成洪水流量の再現であり、実測値との関係を示している。

図で示されるように、2洪水合成及び2005年8月単独に比較して、むしろ3洪水合成の方の再現性が悪い。これは2011年9月と他の洪水では6年の違いがあり、かなり河道の状況が異なっていることや2011年は高い水位に達しており、樹木などにより粗度の状況が異なることなどが考えられる。これに対して2005年の2つの洪水の合成は再現が良好であり、2つの洪水の河道条件が近いと考えられる。2005年8月単独の4つのデータのみからの再現も同様に良好であるが、これはH-n関係が2005年の2つの洪水の合成のものと近似しており、流量観測が適切な時点で行われていれば、1洪水4回程度の観測でも全体の洪水ループを再現できる可能性を示している。

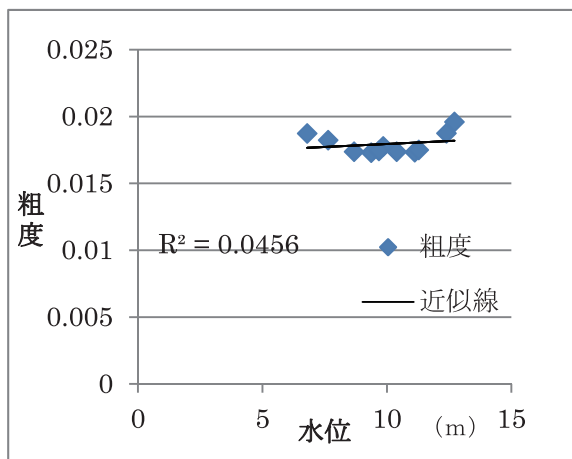


図 - 20 月形 3洪水合成 水位 - 粗度

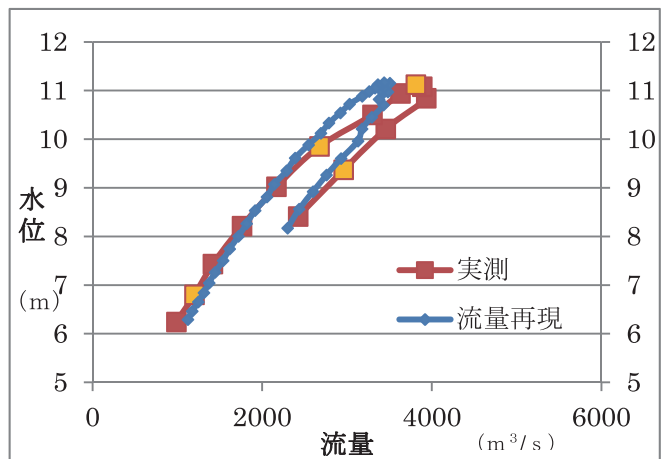


図 - 21 月形2005年8月 3洪水合成流量再現

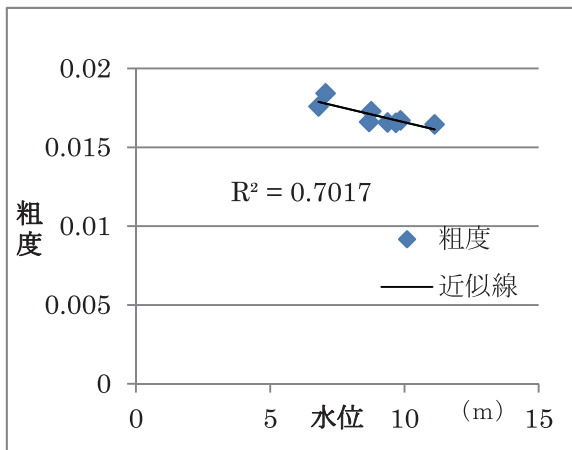


図 - 22 月形2005年8月2洪水合成水位 - 粗度

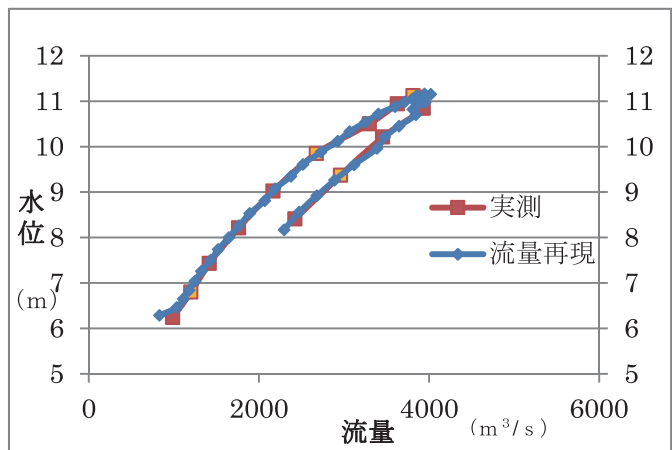


図 - 23 月形2005年8月 2洪水合成 流量再現

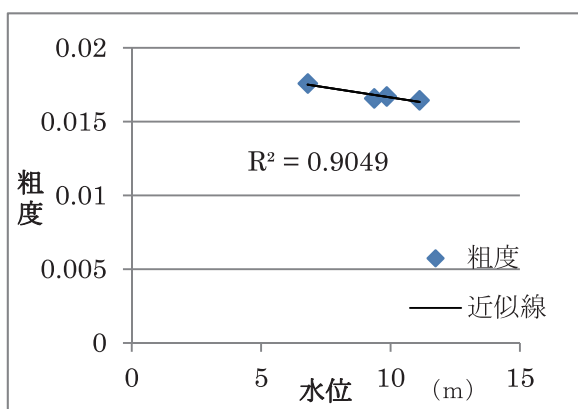


図 - 24 月形2005年8月 単独 水位 - 粗度

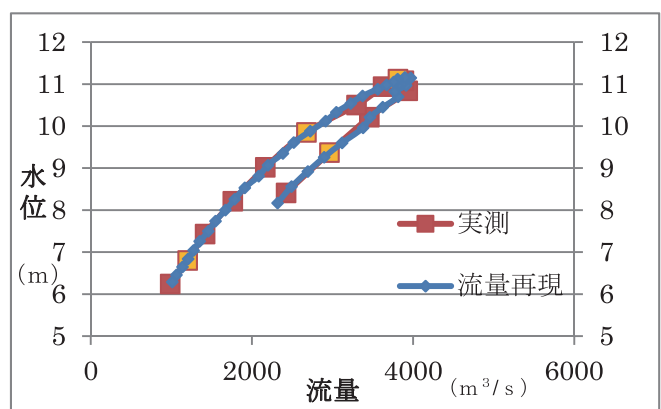


図 - 25 月形2005年8月 単独 流量再現

ii) 2005年9月 月形

同様に2005年9月の洪水再現を行う。図-26は3洪水からのH-n式による流量再現である。図-27は2005年の2洪水からの再現、図-28は2005年9月の3点の観測データのH-n式であり、図-29はそれによる再現である。最も流量再現が良いのは2005年の2洪水のH-n式によるものであり、3つの洪水によるものは再現性が劣り、2011年洪水の影響が考えられる。また2005年9月単独のH-n式によるものも再現性が劣り、3点のみで適合させている再現であることなどが影響していると考えられる。

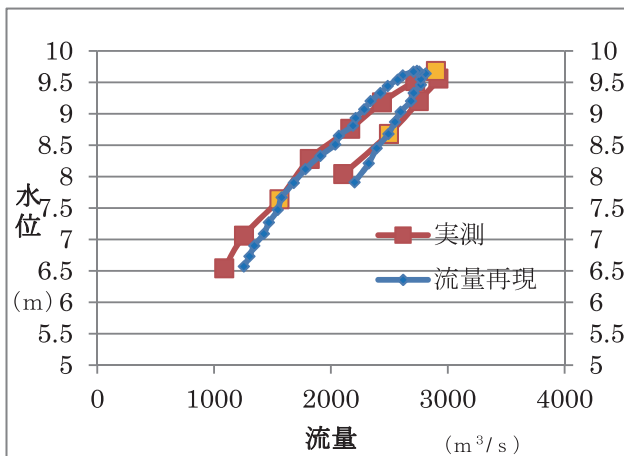


図-26 2005年9月 月形 3洪水合成 流量再現

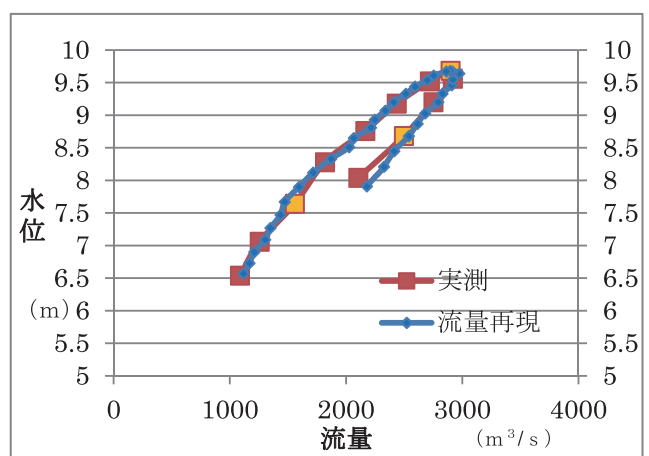


図 - 27 2005年9月月形 2洪水合成 流量再現

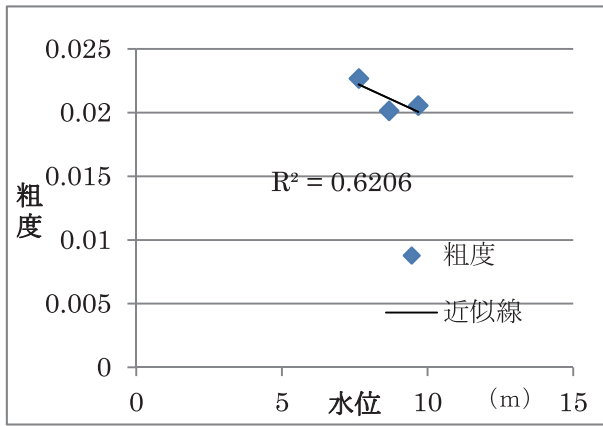


図 - 28 月形2005年9月単独 水位 - 粗度

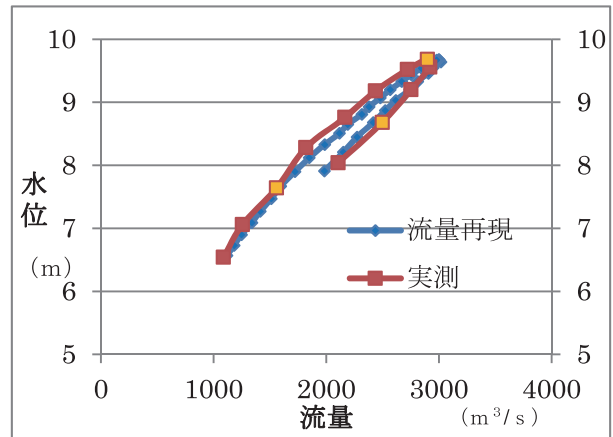


図 - 29 月形2005年9月単独 流量再現

iii) 2011年9月 月形

2011年9月洪水においても、図 - 30に示すように3洪水合成のH-n式を用いた場合の再現精度はあまり良くない。他の洪水同様、河道状況の違う洪水の合成であることが一因と考えられるが、H-n関係式に工夫の余地はあると思われる。これに対し2005年9月単独の場合は4点のみからのH-n式を用いているが、H-n式自体の適合性が良いことなどから、図 - 32に示すように比較的良好に再現されている。

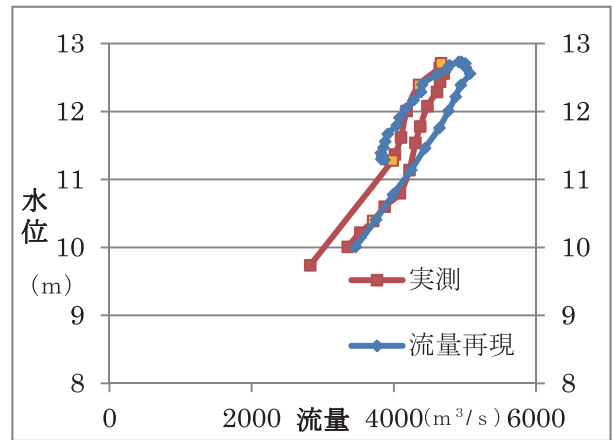


図 - 30 月形2011年9月 3洪水合成 流量再現

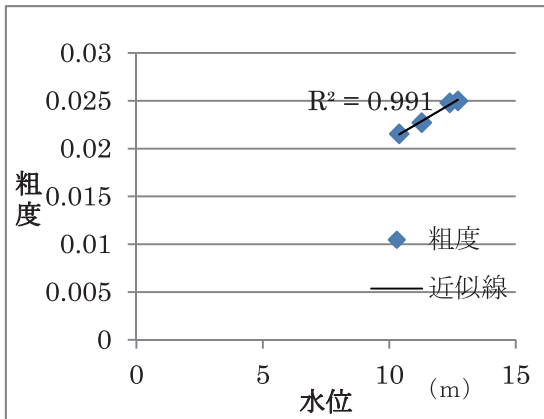


図 - 31 月形2011年9月 単独 水位 - 粗度

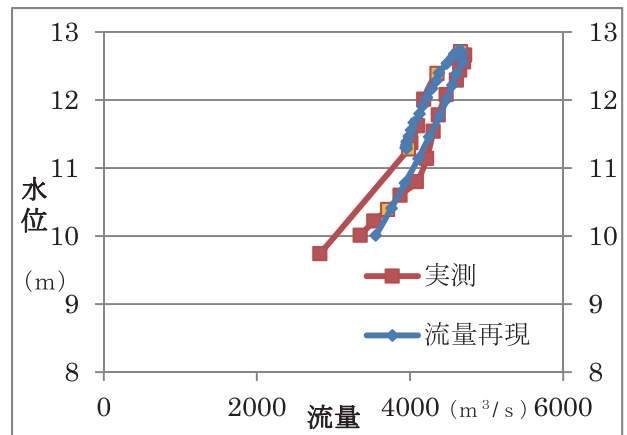


図 - 32 月形2011年9月 単独 流量再現

以上の結果月形観測所の2005年8月、2005年9月洪水の再現においては、H-n関係式を発生時期の近い2005年8月及び2005年9月の2洪水7点から作成したものが最も再現性が良く、次いで洪水単独のデータで再現したものが良く、2011年9月の洪水を合わせて3洪水合成のH-n式を用いたものが最も再現性が悪かった。2011年9月洪水の再現においても4点の当該洪水データによるH-n式の方が3洪水合成H-n式より良い結果となり、あまり時点や条件の違う洪水を合成しない方が良いことを示していると考えられる。なお岩見沢大橋観測所についても同様な傾向であったが、再現性の悪い例がいくつか見られ、検討の余地があるため今回は割愛した。原因としては根本的に流量観測の精度の問題が考えられるが、抽出する

観測データがループを代表する位置でないことや、河道断面のH-R線などの誤差なども影響すると考えられる。適合度が悪い場合でも、さらにH-n式や L_b および ω の組み合わせによって改善する余地はあると思われるが、法則性を見出すのが難しく今後の検討課題である。

6. おわりに

緩流河川で洪水時に発生する水位流量ループを、既往観測データを対象に水位観測値のみから再現することを試みた。トライアルの結果、各洪水で水位流量ループが比較的良好に再現された。また観測数の少ない洪水でも、河道条件の近い既往洪水のデータを加えるなどにより全体のループを良好に再現でき、かつ観測する時点が適切であれば、少ない観測回数でもループが一定程度再現できる可能性が示された。今後さらに手法に一般性を持たせ、再現性を確認していく必要がある。問題は洪水時に1~3時間といった短い時間間隔で流量観測が行われた例が非常に少ないことであり、本研究においては数少ない使えるデータを加えて検討する予定である。

参考文献

- 1) 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・調査編, pp.52-53, 山海堂 1997
- 2) 本永良樹・銭潮潮・山田正・山坂昌成:水位-通水能曲線(HK曲線)を利用した新しい流量算出手法, 土木学会論文集(B1) Vol.68, No.4, pp. I_ 1357- I_ 1362, 2012
- 3) 許士達広:ループを伴う水位流量曲線と粗度の検討, 土木学会第68回年次学術公演会概要集, II - 095, 2013
- 4) 栗城稔・山本泰督:高水流量観測の非定常性を克服する試み, 平成25年度河川情報シンポジウム講演集 2013
- 5) 鮎川登他:河川工学, pp.82-85, 鹿島出版会, 1992
- 6) 室田明:河川工学, pp.15-17, pp.128-129, 技報堂出版, 1986
- 7) 椿東一郎, 荒木正夫:水理学演習(下巻) pp97-103 森北出版, 1962
- 8) 平成17年度幾春別川・空知川外流量観測報告書:北海道開発局 石狩川開発建設部
- 9) 平成23年度幾春別川・空知川外流量観測報告書:北海道開発局 札幌開発建設部