Ｂ－１４　　平成26年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第71号

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

北海学園大学社会環境工学科　フェロー　許士　達広（Tatsuhiro Kyosh）
北海学園大学社会環境工学科　学生員　佐久間　雄基（Yuuki Sakuma）
北海学園大学社会環境工学科　学生員　片岡　尭大（Akihiro Kataoka）

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、通常の流量と同様に、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、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。

２．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 モデルでマニン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

水位観測値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。)

$$\mathrm{I} = \mathrm{I_B} + \frac{1}{\omega}\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathrm{t}} \quad (3)$$

$\mathrm{I_B}$：初期水面勾配　ω：洪水伝播速度

$\partial\mathrm{H}/\partial\mathrm{t}$　：水位変化速度　　t：時間(秒)　H：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。しかし水位変化速度$\partial\mathrm{H}/\partial\mathrm{t}$ は算出ができるため、IB 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は　$\Delta\mathrm{H}/\Delta\mathrm{t}$　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

$$\mathrm{n} = \frac{1}{V} \times R^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Ｖ：流速実測値　　Ｒ：径深

（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。

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

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

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

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

さらに IB 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)式の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。

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

３．今回の検討の条件

１）　初期水面勾配 $\mathrm{I_B}$

従来河床勾配が用いられるべきであるが、既往の検討では観測所付近でも局所的な変化が大きいため、初期値に当該年度の平常時の水面勾配の平均値を用い、計算された流量が観測値に近づくように修正していた。しかし kinematic wave の物理モデルとしては値が固定されるべきであり、観測所付近の計画河床勾配を用いて、各洪水とも $\mathrm{I_B}$一定値とした。

２）洪水伝播速度

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・セドンの法則により広幅長方形断面では，$\omega = 4\mathrm{V}/3$ 広幅放物線形断面では，$\omega = 13\mathrm{V}/9$　三角形断面では$\omega = 5\mathrm{V}/3$で表される。

また　$\omega = dQ/dA$

Q : 流量　　A : 河道断面積　　(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検討した。

例として図-1 に石狩川の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）関係を示す。ω は図の勾配で示されるが線の傾きの小さな違いが ω 値に大きく影響する。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に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。

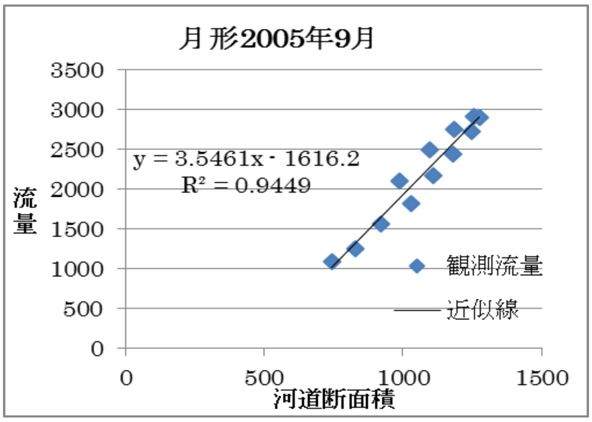

図 - 1　ω算出の例

表 1 に石狩川 2 観測所の 3 洪水の結果を示す。観測された流速の平均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≒1.67 と大差がない。このためここでは $\omega = 5/3V$ に固定して進めることとする。

表 - 1　洪水伝播速度　　(m³/s)

			dQ/dA	
年	月	場所	ω	α
2005	8	月形	3.476	1.703
2005	9	月形	3.546	1.822
2011	9	月形	2.480	0.989
2005	8	岩見沢	4.634	2.147
2005	9	岩見沢	4.174	2.122
2011	9	岩見沢	1.972	0.993
平均			3.380	1.629

3）水位 - 径深（H-R）関係

過去の研究では、矩形断面を仮定して潤辺を川幅としていたが、今回は流量算出に用いる洪水観測時のピーク水位と観測水深から河床断面を算出し、洪水流量に対応する径深を算出した。

4）水位 - 粗度（H - n）関係

各時点における水位と水位上昇速度、実測流量、径深から 3）、4）式で粗度を逆算する。粗度と水位の関係式を用いて、5）と 6）あるいは 7）8）式から流量を再現するが、IB と,ω を固定し R の精度を上げたことにより、流量再現の誤差は粗度に集中する。水位―粗度の関係（H-n 関係式）は水位上昇期と下降期で異なる傾向がみられる場合は別々の式とした。

4. 流量再現

図 - 2 は 2005 年 8 月洪水の岩見沢観測所の H-n 曲線である。水位上昇期（赤）と下降期（青）に分けて直線で近似した。黄色はそのうち水位上昇期と下降期から 4 点を選んだもので、仮に 4 点しか観測しなかった場合を想定したものである。

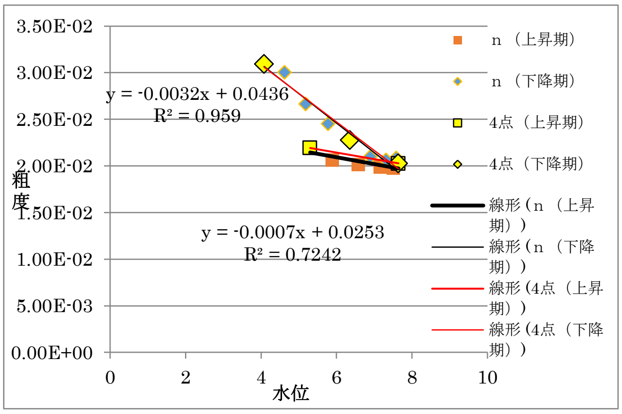

図 - 2　水位 - 粗度関係図

全流量観測データの H - n関係から求められる再現流量は図 - 3 のようになり、かなり良好に再現されている。

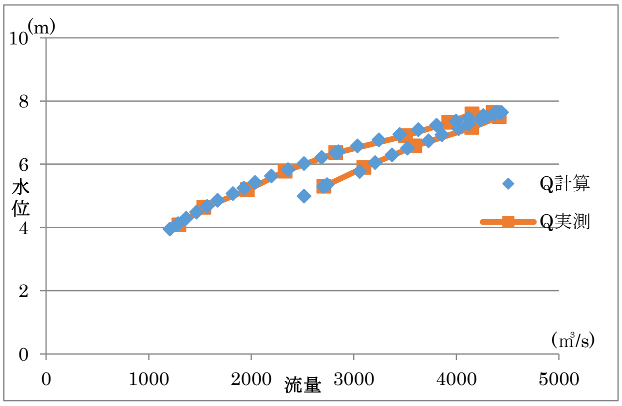

図 - 3　実測流量と再現流量

図 - 2 の黄色の点を用いて水位上昇期 2 点下降期 3 点から H-n 式を出して流量を算出すると、図 - 4 のようにピーク付近は少し合わないが同様にループが算出される。適切な時点で流量観測が行われれば、実際の少ない洪水流量観測値からでも各時刻の水位に対応する流量ループを再現できる可能性があることがわかる。

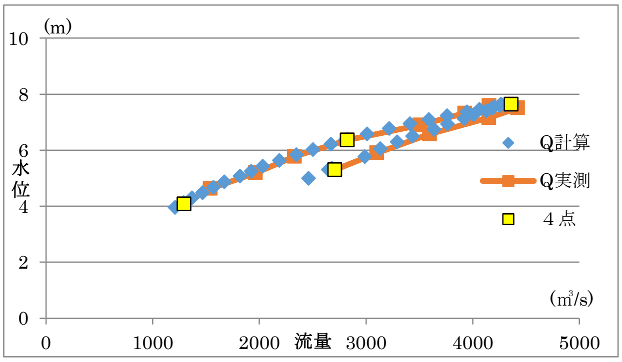

図 - 4　代表 4 点による流量再現