雨量・水位データと流出モデルを用いた 水位流量曲線作成法の実用性

A METHOD FOR ESTABLISHING STAGE-DISCHARGE CURVE
BY USING RAINFALL, WATER LEVEL DATA AND RUNOFF MODEL

田村隆雄¹・山下瑛人²・武藤裕則³

Takao TAMURA, Akito YAMASHITA, and Yasunori MUTO

¹正会員 博(工) 徳島大学 准教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²学生会員 学(工) 徳島大学 大学院先端技術科学教育部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

³正会員 Ph.D 徳島大学 教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

A method for establishing stage-discharge curve (H - Q curve) using a runoff model to the rainfall observed in a basin and the water level observed in a river channel was discussed. A quadratic function that represented the relation between water level and discharge was built into the runoff model. When the observed water level hydrographs at some floods were reproduced, the H - Q curve was obtained. The method was applied to six water level stations in Shikoku which observed runoff quantity, and the established curve was compared with the H - Q curve based on the runoff observation. Two major findings were obtained: (1) a satisfied H - Q curve in which the error was 5-17% compared with measurement H - Q curve could be set up by using the data of one main flood event when there was a rain-gauge stations for each 30km² in the basin or more; (2) a useful H - Q curve was still obtained by using a lot of flood events when the rain-gauge stations were sparse and were unevenly distributed.

Key Words : Stage-discharge curve(H - Q curve), Water budget, Runoff model, Quadratic function

1. はじめに

流出解析の多くは雨量と流量の観測資料を用いて行われる。このうち流量は事前の水位流量観測から作成された水位一流量曲線（以下、 H - Q 曲線）から算出されるのが普通である。一方で国土交通省の水文・水質データベースや地方自治体の防災WEBページを見ると流量に比べ水位の情報量が圧倒的に多い。これは流量観測のコストが高いことや防災観点では水位情報で十分な場合が多いことが理由と考えられる。著者らはこれらの点に注目して情報量が豊富な水位情報を用いた流出解析法を提案し、流量観測が行われていない中小河川の洪水解析、例えば平成16年に襲来した複数の台風による徳島・香川県下の中小河川洪水のハイドログラフの再現¹⁾や、平成21年9月の佐用洪水のピーク流量の推定²⁾を行ってきた。

この解析法では流量の推定値が得られるので、副産物として水位観測点における H - Q 曲線の作成が可能である。しかし水位流量観測を実施している観測所に本解析法を

適用して、実際に運用されている H - Q 曲線と比較するといった検証までには至っていなかった。

雨量・水位データを使った流出解析法によって作成される H - Q 曲線の実用性を検証することができれば、蓄積された膨大な水文データを有効活用して H - Q 曲線を安価に整備できる。また現時点で水位を観測していない河川であっても観測点に安価なロガー付き水位計を設置するだけで H - Q 曲線を作成することが可能になることから、例えば、数が多く管理コストの面でも制約が大きい中小河川の管理に貢献できる。

以上のような経緯から、本研究では四国の一級水系に属する6箇所の水位流量観測所を対象に、雨量・水位データを用いた流出解析法を適用して H - Q 曲線を作成する。この方法で得られる曲線を“モデル H - Q 曲線”と記す。そして流量観測から作成、運用されている H - Q 曲線（以下“流観 H - Q 曲線”）と比較して、ほぼ同程度の実用に耐えうるものが得られるかどうかを考察する。そして実用性の高いモデル H - Q 曲線を得るための留意点や応用性について知見を得る。

図-1 水位レベルの設定例（区間数：3）

2. 雨量・水位データを用いた流出解析法

(1) 概要

雨量・水位データを用いた流出解析法は、任意の流出モデルに水位・流量変換モデルを組み合わせ、流域平均雨量から流量、流量から水位を計算し、計算水位ハイドログラフと観測水位ハイドログラフが一致するようにモデルの未知パラメータを同定するものである。本研究では流出モデルとして地表面流分離直列2段タンクモデル³⁾を使用する。以下ではモデルH-Q曲線の作成に直接関わる水位・流量変換モデルと計算法を説明する。

(2) 水位・流量変換モデル

水位・流量の変換法としてはManning公式を用いた方法が考えられる⁴⁾が、本研究では実務でも採用されている以下のような2次関数⁹⁾を用いる。

$$Q = \rho(H + \omega)^2 \quad (1)$$

ここで ρ 、 ω は係数、 H は水位である。流量 Q は水位 H とそれに対応する ρ と ω の関数であって、ある H に対して1つの Q が決まる水位流量と仮定する。

モデルの適用にあたっては、図-1に示すように、まず観測地点のH-Q関係を表せるよう、河道横断面形状を参考にして水位レベルを適当な数だけ設定し、区間 $(i-1 \sim i)$ 毎に式(2)を設定する。

$$Q_i = \rho_i(H_i + \omega_i)^2 \quad (2)$$

ここで Q_i は事前に設定した水位レベル H_i に対応する水位流量で未知パラメータ、 ρ_i と ω_i は区間 $(i-1 \sim i)$ の係数で未知パラメータである。

次に全区間のH-Q式を繋げる。まず式(2)に H_1 とそれに対応する Q_1 および ω_1 を代入して ρ_1 を決定する。次に Q_1 と H_1 、 Q_2 と H_2 が $Q_i = \rho_2(H_i + \omega_2)^2$ の下限と上限であることから、これに代入して比をとると、次のように ω_2 が定まり、次いで ρ_2 も決定できる。

表-1 水位流量観測所流域の概要

観測所名	水系・河川名	流域面積	H-Q曲線作成年月	雨量計の数
みょうじん明神	土器川・土器川	37 km ²	2007年8月	2
おもてがわ表川	重信川・表川	66 km ²	2007年7月	3
あかんま明間	肱川・肱川	105 km ²	2007年6月	3
いけかわ池川	仁淀川・土居川	130 km ²	2007年8月	4
しもやかわ下八川	仁淀川・上八川	160 km ²	2007年8月	5
くりのき栗ノ木	四万十川・四万十川	165 km ²	2009年8月	1

$$\omega_2 = (H_2 \sqrt{Q_1/Q_2} - H_1) / (1 - \sqrt{Q_1/Q_2}) \quad (3)$$

$$\rho_2 = Q_1 / (H_1 + \omega_2)^2 \quad (4)$$

これで河床から水位レベル H_2 までの仮H-Q曲線ができる。この作業を設定した区間数だけ繰り返すと観測点の仮H-Q曲線ができあがる。同定すべき未知パラメータは各水位レベルに対応する水位流量 Q_i と ω_i である。

最後にパラメータ同定であるが、まず観測雨量を流出モデルに入力して流量を試算する。この試算流量を水位・流量変換モデルに入力して仮H-Q曲線から水位を計算する。そして解析期間内の計算水位と観測水位との誤差を最小とするような流出モデルと水位・流量モデルの最適パラメータ組を求める。最適パラメータ組による仮H-Q曲線は実際の水位・流量関係を表現できるものとしてモデルH-Q曲線として採用する。

(3) 使用する水文データと計算方法

使用する水文データは国土交通省水文・水質データベースより時間データを入手した。モデルに入力する流域平均雨量はティーセン分割法を用いて計算し、遮断モデル³⁾を用いて得られる地表面到達雨量を使用した。パラメータ同定は洪水期間中の観測水位ハイドログラフと計算水位ハイドログラフの誤差二乗和の平均値が最小となるようにシンプレックス法を用いて探索した。

3. 対象とした水位流量観測所と洪水イベント

(1) 水位流量観測所

モデルH-Q曲線の実用性を考察するため、流域内外の雨量観測所の数や配置が異なる6つの水位流量観測所を選定した。いずれも四国の一級水系に属する国土交通省所管の観測所である。それら観測所の諸元を表-1に、雨量観測所の配置を図-2に示す。観測所のH-Q曲線は定期的に見直されているが、本研究では2007年から2009年に作成されたH-Q曲線を流観H-Q曲線とした。雨量計は図

図-2 観測所流域内の雨量観測所の配置

中に示した以外にも存在するが、洪水イベントで欠測等があった計算に使用しなかった観測所は記していない。雨量観測所密度は明神観測所流域と表川観測所流域が高く、栗ノ木観測所流域が最も低い状況であった。一般的に雨量観測所密度が高いほど正確な流域平均雨量を計算でき⁹⁾、流観 $H-Q$ に近いモデル $H-Q$ 曲線ができると考える。

(2) 洪水イベント

モデル $H-Q$ 曲線作成のために使用する洪水イベントは各観測所において近年観測されたもののうち、最高水位が第1位のものを採用して、高水位までカバーできる $H-Q$ 曲線を作成する。表-2に使用する洪水イベントを示す。洪水イベントあるいは流域によっては、雨量観測所の密度や配置の影響を受けて正確な水収支に支障をきたす場合もあると考え、流観 $H-Q$ 曲線とモデル $H-Q$ 曲線が大きく乖離する場合には、使用する洪水イベントを複数にして再計算する。雨量観測所の密度や配置に欠点があっても流域平均雨量の精度が特定の洪水イベントでは低くても、洪水イベントの数を増やすことによって向上すると予想し、流観 $H-Q$ 曲線に近いものになると考える。

4. 解析結果と考察

(1) 1洪水イベントを使って得られたモデル $H-Q$ 曲線

図-3に対象流域6箇所の結果を示す。上から明神、表川、明間、池川、下八川、そして栗ノ木で、左列に流域平均ハイドログラフ、洪水水位ハイドログラフの観測値

表-2 モデル $H-Q$ 曲線作成に使用した洪水イベント

観測所名	洪水期間	総降水量	最大降雨強度	最高水位
みょうじん 明神	2005/9/4- 2005/9/7	285mm	23mm/hr	3.35m
おもてがわ 表川	2004/9/27- 2004/9/30	170mm	32mm/hr	3.40m
あかんま 明間	2004/10/18- 2004/10/21	211mm	23mm/hr	3.50m
いけかわ 池川	2005/9/4- 2005/9/7	841mm	42mm/hr	7.31m
しもやかわ 下八川	2004/10/18- 2004/10/21	423mm	66mm/hr	7.23m
くりのき 栗ノ木	2004/10/18- 2004/10/21	609mm	81mm/hr	8.95m

とモデル再現値を示し、右列に流観 $H-Q$ 曲線とモデル $H-Q$ 曲線の比較を示している。流観 $H-Q$ 曲線が水位の低い箇所で切れているのは、流量観測を行った洪水イベントとモデル $H-Q$ 曲線の作成に用いた洪水イベントが異なることが主な理由である。左列の水位ハイドログラフの再現結果を見ると、どの観測所も誤差は認められるものの、ピーク水位と全体的な波形は良好に再現できていると判断する。

表-3に各観測所の水位区間毎のモデル $H-Q$ 曲線を示す。例えば区間1は河床から水位レベル H_1 までの区間であり、その区間に適用されるモデル $H-Q$ 曲線と水位レベル H_1 、それに対応する流量 Q_1 が示されている。本研究で設けた

(a) 水位ハイドログラフの再現結果（明神）

(b) H-Q曲線の推定結果（明神）

(c) 水位ハイドログラフの再現結果（表川）

(d) H-Q曲線の推定結果（表川）

(e) 水位ハイドログラフの再現結果（明間）

(f) H-Q曲線の推定結果（明間）

(g) 水位ハイドログラフの再現結果（池川）

(h) H-Q曲線の推定結果（池川）

(i) 水位ハイドログラフの再現結果（下八川）

(j) H-Q曲線の推定結果（下八川）

(k) 水位ハイドログラフの再現結果（栗ノ木）

(l) H-Q曲線の推定結果（栗ノ木）

図-3 水位ハイドログラフの再現およびモデルH-Q曲線と流観H-Q曲線の比較

表-3 1洪水イベントを使って作成したモデルH-Q曲線

水位 区間	みょうじん 明 神	おもてがわ 表 川	あかんま 明間	いけかわ 池川	しもやかわ 下八川	くりのき 栗ノ木
1	$Q=2.63(H+0.95)^2$ $H_1=1.0\text{m}$ $Q_1=10.0\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=0.045(H+0.98)^2$ $H_1=0.5\text{m}$ $Q_1=0.1\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=1.47(H+0.1)^2$ $H_1=1.2\text{m}$ $Q_1=2.5\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=0.43(H+0.9)^2$ $H_1=1.8\text{m}$ $Q_1=3.14\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=0.30(H+0.3)^2$ $H_1=1.8\text{m}$ $Q_1=1.34\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=9.07(H+0.9)^2$ $H_1=1.2\text{m}$ $Q_1=40\text{ m}^3/\text{s}$
2	$Q=13.51(H+0.14)^2$ $H_2=1.5\text{m}$ $Q_2=25.0\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=0.61(H-0.095)^2$ $H_2=1.0\text{m}$ $Q_2=0.5\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=71.36(H-1.01)^2$ $H_1=3.6\text{m}$ $Q_1=445\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=39(H-1.516)^2$ $H_2=4.3\text{m}$ $Q_2=300\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=68.89(H-1.66)^2$ $H_2=4.15\text{m}$ $Q_2=427\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=6.94(H+1.2)^2$ $H_2=2.4\text{m}$ $Q_2=90\text{ m}^3/\text{s}$
3	$Q=17.75(H+0.31)^2$ $H_3=2.0\text{m}$ $Q_3=50.5\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=0.34(H-0.207)^2$ $H_3=1.5\text{m}$ $Q_3=1.0\text{ m}^3/\text{s}$		$Q=129.6(H-2.76)^2$ $H_3=4.9\text{m}$ $Q_3=4.9\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=86.14(H-1.92)^2$ $H_3=4.95\text{m}$ $Q_3=789\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=76.75(H-1.32)^2$ $H_3=3.6\text{m}$ $Q_3=400\text{ m}^3/\text{s}$
4	$Q=13.51(H+0.07)^2$ $H_4=2.5\text{m}$ $Q_4=80.0\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=10.8(H-1.196)^2$ $H_4=2.0\text{m}$ $Q_4=7.0\text{ m}^3/\text{s}$		$Q=16.04(H+1.19)^2$ $H_4=5.4\text{m}$ $Q_4=700\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=83.3(H-1.87)^2$ $H_4=7.24\text{m}$ $Q_4=2400\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=3.87(H+6.57)^2$ $H_4=4.8\text{m}$ $Q_4=500\text{ m}^3/\text{s}$
5	$Q=4.46(H+1.74)^2$ $H_5=3.0\text{m}$ $Q_5=120\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=216(H-1.82)^2$ $H_5=2.5\text{m}$ $Q_5=100\text{ m}^3/\text{s}$		$Q=50.27(H-1.67)^2$ $H_5=7.32\text{m}$ $Q_5=1600\text{ m}^3/\text{s}$		$Q=24.37(H-0.27)^2$ $H_5=6.0\text{m}$ $Q_5=800\text{ m}^3/\text{s}$
6	$Q=13.43(H+0.27)^2$ $H_6=3.5\text{m}$ $Q_6=140\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=68.6(H-1.29)^2$ $H_6=3.0\text{m}$ $Q_6=200\text{ m}^3/\text{s}$				$Q=66.62(H-2.53)^2$ $H_6=7.2\text{m}$ $Q_6=1450\text{ m}^3/\text{s}$
7		$Q=15.7(H+0.567)^2$ $H_7=3.5\text{m}$ $Q_7=260\text{ m}^3/\text{s}$				$Q=0.294(H+62.99)^2$ $H_7=8.4\text{m}$ $Q_7=1500\text{ m}^3/\text{s}$

水位レベルの数は明神が6、池川が5、明間が2、下八川が4、表川が7、栗ノ木が7であった。概して流域面積が大きく観測所位置の河道横断面形状が単純なほど水位レベルの設定数が少なく済む傾向にある。

図-3右列のH-Q曲線を見ると、表川、明間、池川、下八川ではモデルH-Q曲線が流観H-Q曲線にほぼ合致した。2種類のH-Q曲線の流量誤差の平均は、表川16%、明間9%、池川17%、下八川5%であった。大きな出水前後でH-Q関係が変化することがあることや、2種類のH-Q曲線が異なる洪水イベントから作成されている点、浮子による流量観測やH-Q曲線の精度^{7), 8), 9)}などを考えれば、この4カ所では流観H-Q曲線に遜色ないモデルH-Q曲線が得られたと考える。一方、栗ノ木と明神のモデルH-Q曲線は流観H-Q曲線と全く異なる結果となった。

(2) 複数の洪水イベントを使った場合のモデルH-Q曲線

洪水イベントを洪水時の最高水位で降順に並べ、上位3イベントと上位5イベントを用いて明神観測所と栗ノ木観測所の再計算を行った。使用した洪水イベントを表-4、結果を図-4に示す。まず明神のモデルH-Q曲線では、高水位区間での変化が若干見られるが、低水位では全く変化しなかった。そこで流観H-Q曲線の作成に使用された2009年8月の洪水イベント（表-4の明神観測所順位3の洪水）の水収支を流観H-Q曲線から計算すると、総降水量154mmに対して洪水期間中の流出高221mmと流出超過（約1.4倍）となり、流観H-Q曲線の不具合が考えられた。図-5に水位観測点の河道横断面を示すが、明神観測所は川幅が狭く大岩が多数不規則に露出していることから、

表-4 追加計算で用いた洪水イベント

順位	明神観測所			栗ノ木観測所		
	最高 水位	総雨量	洪水 年月	最高 水位	総雨量	洪水 年月
1	3.35m	285mm	2005/9	8.95m	609mm	2004/10
2	3.30m	125mm	2004/9	8.14m	968mm	2005/9
3	2.05m	154mm	2009/8	7.06m	366mm	2004/8
4	1.95m	120mm	2004/8	6.98m	519mm	2004/6
5	1.50m	101mm	2010/6	4.84m	585mm	2006/8

洪水時の正確な流量観測は困難が伴うと想像される。

次に栗ノ木であるが、水位3.6m～6.0mで顕著な改善が見られる。この区間における流観流量に対する誤差の割合の平均は1洪水で25%、3洪水で21%、5洪水では11%と洪水イベント数を増やすほどモデルH-Q曲線が流観H-Q曲線に近づいた。ただし水位2.4m～3.6mの区間では流観H-Q曲線と乖離したほか、水位7.2m以上の区間では全く改善できていない。前者の原因は不明であるが、後者についてはこの水位区間が上位2つの洪水イベントでしかカバーできない事が原因と考える。栗ノ木のように水収支計算に雨量観測所の数や配置の影響が大きいと考えられる場所では、洪水イベントを増やして計算することで流観H-Q曲線に遜色ないものが得られる見込みがある。

5. 結論

雨量・水位データと流出モデルを使用した水位－流量

(a) H-Q曲線の推定結果（明神）

(b) H-Q曲線の推定結果（栗ノ木）

図-4 複数の洪水イベントを使って作成したモデルH-Q曲線

(a) 明神観測点

(b) 栗ノ木観測点

図-5 水位流量観測所の河道横断面
(明神、栗ノ木 いずれも上流から望む)

曲線作成法の実用性について6箇所の水位流量観測所流域を対象に考察を行い、次のような知見を得た。

- (1) 観測所流域の水収支を良好に計算できる雨量観測所の数と配置であれば、1つの大きな洪水イベントを使って流観H-Q曲線と同程度のモデルH-Q曲線を作成することができる。
- (2) 雨量観測所の数や偏在が水収支計算に大きな影響を及ぼすと考えられる場合、モデルH-Q曲線の精度を高める1つの手段として使用する洪水イベント数を増やすことが有効だと考えられる。

また雨量計の密度が低い栗ノ木観測所流域と流量観測点の河道横断面が複雑な形状を呈している明神観測所流域における議論から、次のようなモデルH-Q曲線の応用が考えられた。

- (1) 水収支という視点からの流観H-Q曲線の検証。
- (2) 流域の水文データの品質向上や観測の効率化に関

する検討。例えば雨量観測所の数や配置、流量観測における浮子形式の選定や測線数などの検討。

その他、流観H-Q曲線が整備されていない高水位区間の外挿等にも応用できると考えられる。今後はさらにモデルH-Q曲線の特徴や適用に関する知見を集積し一般化を目指したい。またH-Q曲線が未整備の山地河川や中小河川での洪水流量評価などにも活用したいと考えている。

謝辞：本研究では国土交通省四国地方整備局からH-Q曲線の資料提供を受けました。また平成24年度科学研究費補助金（基盤研究(C)、課題番号24560624）の補助を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 田村隆雄，端野道夫，橋大樹：一般中小河川にも適用可能な雨量・水位データを用いた流出解析モデルパラメータの同定手法，水工学論文集，50，pp.350-355，2006。
- 2) 田村隆雄，中内章浩，小川健一郎：平成21年9月佐用水害の洪水ピーク流量の推定と流出特性に関する考察，水工学論文集，55，pp.559-564，2011。
- 3) 端野道夫，田村隆雄，田淵昌之，富士川洋一：森林流域における遮断蒸発・蒸散量と流域地中保水量の分離・評価法，水工学論文集，48，pp.31-36，2004。
- 4) 田村隆雄，端野道夫，橋大樹：雨量・水位データを使用したH-Q曲線の作成方法，土木学会四国支部平成18年度自然災害フォーラム論文集，pp.1-8，2006。
- 5) 社団法人日本河川協会編：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説 調査編，p.52，技報堂，1997。
- 6) 川畑幸夫編著：水文気象学2版，pp.64-67，地人書館，1967。
- 7) 土木学会：水理公式集[平成11年度版]，pp.75-86，丸善，1999。
- 8) 山口高志：洪水流速および流量観測—その1—，水文・水資源学会誌，Vol.15，No.6，pp.625-635，2002。
- 9) 独立行政法人土木研究所編著：平成14年度版水文観測，pp.132-157，社団法人全日本建設技術協会，2002。

(2012. 9. 30受付)