# 水位ハイドログラフと二次元不定流解析を用いた 高水敷粗度及び流量ハイドログラフの推定

ESTIMATION OF FLOODPLAIN ROUGHNESS AND DISCHARGE HYDROGRAPH USING WATER LEVEL HYDROGRAPHS AND 2-D NUMERICAL SIMULATION

森下 祐<sup>1</sup>•内田龍彦<sup>2</sup>•河原能久<sup>3</sup>

Yu MORISHITA, Tatsuhiko UCHIDA and Yoshihisa KAWAHARA

<sup>1</sup>学生会員 広島大学大学院博士前期課程 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1) <sup>2</sup>正会員 広島大学大学院助教 工学研究科 (同上) <sup>3</sup>フェロー会員 広島大学大学院教授 工学研究科 (同上)

Accurate estimation of discharge hydrograph during flood events has been one of the most important issues in River Engineering. In this study numerical simulations of flood flows in a compound meandering channel are carried out using a 2-d numerical model to discuss the possibility to reproduce the discharge hydrograph only with the information on water levels. It is demonstrated that the numerical simulation with water level hydrographs at upstream and downstream boundaries can well reproduce the discharge hydrograph at the section in the middle reach and hence that the discharge hydrograph at upstream end is not always necessary. It is also shown that since discharge hydrograph is very sensitive to the magnitude of floodplain roughness, even a record of flood discharge at high water stage, not necessarily at the flood peak, may give good estimation of floodplain roughness, leading to highly accurate estimation of discharge hydrograph.

Key Words: water level hydrograph, discharge hydrograph, 2-d numerical model, flood, compound meandering channel, floodplain roughness, flood propagation

# 1. 序論

複断面河道は、治水、利水、環境、土地利用等の 様々なニーズに対応できるため、我が国の大河川下 流部で多く採用されている.このような複断面河道 を洪水流が流下すると、ピーク流量の低減や流量ハ イドログラフの変形が顕著に表れる<sup>1)</sup>.そのため、 河道計画や治水安全度評価において、これらの現象 を正確に把握し、洪水流量を精度良く算定すること が求められている.

一般的に、精度の高い流量ハイドログラフの観測 は困難であり、近年においても多くの研究者、技術 者がこの問題に取り組んでいる。例えば、喜沢・井 出<sup>3</sup>は、現状の流量観測法(2 点法など)のほか回 転式流速計やADCPなど複数の計測器を用いた観測 を同時に行い、比較することで現状の観測法による 観測誤差の程度を示している。

一方,福岡ら<sup>3)</sup>は,水位は流量に比べて測定が容易であり,かつ精度が高いことに着目し,水位観測

データから二次元不定流解析を介して,洪水流量ハ イドログラフを推算する手法を提案している.水位 観測データから流量ハイドログラフを推算するため には,適切な粗度係数分布を評価する必要がある. 福岡ら<sup>3</sup>は,その評価のために流量ハイドログラフ の観測値を利用している.一方,洪水流の伝播速度 は,断面平均流速の影響を強く受けるとともに,水 位ハイドログラフから最大水位を流下方向に追跡す ることによって算出することが可能である.これら のことを考慮すると,洪水流の水位の伝播速度から, 適切な粗度係数分布を評価することで,原理的には 洪水水位の時空間データのみから流量ハイドログラ フを推定することができると言える.

本論文は、その可能性を検証することを主目的と する.このために、複断面蛇行水路において、高水 敷粗度係数の大きさの違いが水位や流量、洪水流の 伝播速度に及ぼす影響について検討する.実際の洪 水での粗度係数は、低水路では河床波の形成、高水 敷上では草本類の倒伏などにより、その大きさが時



空間的に変動することが知られている<sup>1)</sup>.しかし,本論文では基礎的な検討を行うため,取り扱う粗度 係数は時空間的に一定としている.本論文では,最 初に複断面蛇行水路における非定常実験<sup>4)</sup>及び二次 元不定流解析手法<sup>5)</sup>の概要を説明し,数値解析モデ ルが実験結果を再現することを示す.そして,高水 敷粗度係数を系統的に変化させた数値解析を行い, その結果を比較,検討する.

# 2. 複断面蛇行水路の非定常実験と二次元数値 解析

#### (1)非定常実験の概要<sup>4)</sup>

図-1(a), (b)に実験水路の概要を示す.低水路は 滑面の固定床であり,高水敷上には人工芝が貼られ ている.非定常実験では、図-1(c)に示す流量ハイド ログラフを上流に与えた.一方,洪水期間中を通じ て、図-1(a)に示す水面勾配制御区間での水面勾配が 河床勾配と一致するように下流端の水位をゲート操 作によって自動調整している.これにより、本論文 で扱う洪水流は、下流の影響が上流に及んでいる流 れとなり、数値解析を行う際、水位の時空間データ が重要な意味を有する流れと言える.

水位測定は、サーボ式波高計を用いて縦断方向に 9点(図-1(a):①~⑨)、流速測定(図-1(a):斜線 部)は、電磁流速計を用いて断面⑥から⑦の領域で 行い、共に1秒毎に連続的に計測している.また、 流量は、断面①については、図-1(c)の流量ハイドロ グラフとしている.それより下流の断面については、 各断面区間の貯留量が、その区間の上流側からの流



図-5 平面流速分布の実験結果と解析結果の比較

入流量と下流側からの流出流量の差で定義されると して,水位の測定値の時間変化から各区間の貯留量 を求め、断面①から下流方向へ追跡計算することで 算出している.

#### (2) 数値解析方法と計算条件の概要

本論文では,著者ら 5が提案した二次元数値解析 手法を用いる.その解析手法は,デカルト座標系で, 1 メッシュに対して点値,線平均値,面平均値を連 立して解く方法であり,任意形状の境界条件を考慮 することが可能である.これまでに市街地氾濫解析 に適用されており,良好な結果を示している<sup>の</sup>.数 値解析法の詳細については文献 5)で詳細に述べられ ているため、ここでは低水路と高水敷の境界におけ る底面高さの不連続性の評価方法のみに言及する.

図-2(a)に示すように水位が高水敷高さより高い 場合には従来通り、点値、線平均値、面平均値の地 盤高で評価することとし(ただし,図-2(a)は線平均 値のイメージである),図-2(b)に示すように水位が 低い場合においては,高水敷を壁面として取り扱い, 流体占有率によって壁面形状を正確に評価している. 計算格子のサイズをΔx=0.1m, Δy=0.05m とし,時間

刻みをΔt=0.005 秒として計算を行う.

境界条件は、上流端に流量ハイドログラフ、下流 端に水位ハイドログラフを与えることが多い. しか し、本論文では、前述したように水位の時空間デー タが重要となる洪水流を扱っているため, 福岡<sup>3)</sup>の 計算法と同様に与える.即ち,水路の上下流端に仮 想の pond を設け, 断面①, ⑨での水位ハイドログラ フの実験結果を再現するように pond 内に水位変動 を与える. さらに, 低水路及び高水敷の粗度係数は, 水位の縦断変化や時間変化の解析結果が実験結果と 一致することと、断面⑤において解析値と実験値の 流量の差異が最小となるように決定された. その結 果,低水路粗度係数は0.010,高水敷粗度係数が0.021 と求められた.

## (3) 解析結果とその考察

図-3(a), (b)にそれぞれ増水期(200~800秒)と 減水期(800~2000秒)の縦断水位分布の時間変化, 図-4 に断面①, ⑤, ⑨における流量ハイドログラフ の実験結果と解析結果の比較を示す、縦断水位分布 の解析結果は実験結果と全体的に一致している.流



の縦断位置と発生時刻の関係の比較

	高水敷粗度n <sub>fp</sub>	n <sub>fp</sub> の相対変化(%)
case1	0.010	-52.4
case2	0.017	-19.0
case3	0.019	-9.5
case4	0.020	-4.8
case5	0.021	0.0
case6	0.022	4.8
case7	0.023	9.5
case8	0.025	19.0
case9	0.030	42.9

表-1 解析ケース

量ハイドログラフは増水からピーク,減水を含む水 深,即ち,相対水深 Dr >0.3 (相対水深 Dr :低水路 底面からの水深に対する高水敷上の水深)で概ね一 致しており,ピーク流量の低減や遅れを精度良く再 現できている.増水初期,減水後期では,流量の解 析結果と実験結果に多少の違いが生じている.これ には,低水路と高水敷間での水の乗り上げや落ち込 み等の三次元的な流れの形成,高水敷上の人工芝が 水深に比べ無視できない等の影響が考えられるが, 二次元解析で表現することが困難な流れとなるため である.

図-5 に流速測定区間でのピーク付近(t=880s)に おける流速分布の実験結果と解析結果を示す.流速 は、低水路流れと高水敷流れの混合領域を除いて、 全体的に一致しており、本解析モデルは主流線上や 高水敷上の流速を概ね再現している.

図-6に、実験及び解析結果のピーク水位の縦断位 置と発生時刻の関係を示す.ここで、本論文におけ るピーク水位の発生時刻は、図-7に示すように、平 水時の水位から最大水位の90%以上に達した領域 の図心の時間と定義している.なお、下流部(下流端 からの距離:650 cm)での実験結果については、後 述する伝播特性及び周囲との実験結果の比較から、



図-7 ピーク水位の発生時刻の模式図

計測誤差に因るものであると考えている. 図-6 の解 析結果には、ピーク水位発生時刻を算出する際に用 いる水位ハイドログラフに対し、横断平均値を用い た場合(断面平均値)と横断面内の低水路部分のみの 平均値を用いた場合(低水路平均値)を示している. この低水路平均値と断面平均値の比較より、形状は ほぼ一致しているものの、ピーク水位の発生時刻は、 低水路平均値の方がやや早くなっている. このこと は、横断面内において低水路を中心に洪水流が伝播 していくことを示している.

次に、実験結果と解析結果(低水路平均値)を比較 すると、ピークの発生時刻は一致しておらず、全体 的に 5~10 秒程度,解析結果の方が遅れている.こ れは前述した上下流端での境界条件の与え方に起因 する誤差であると考えられる.この誤差は、図-3、 図-4 で示したように、縦断水面形及び流量ハイドロ グラフの比較には、殆ど影響を与えない程度である. しかし、図-6 に示したピーク水位の発生時刻及び伝 播速度の定量的な評価のためには、境界条件の与え 方などを改善していく必要がある.

洪水流の伝播特性は、図-6 では右に凸の形状とし て表されており、下流端付近では下流から上流に洪 水流が伝播していることがわかる.これは、水面勾 配制御区間内の水面勾配は、下流部のゲート操作に より、強制的に一定の状態に保たれているためであ る.即ち、制御区間の上下流端断面におけるピーク 水位の発生時刻が等しいが、制御ゲートの影響は有 限の速さで上流に伝播するため、結果として区間内 で凸の形状を示すことになる.このように本実験で は、下流端のゲートの影響が洪水流の伝播に強い影 響を及ぼしていることがわかる.本解析結果は、上 下流端の境界条件に多少の誤差を含むものの、この ような実験結果の特徴を概ね説明できている.



図-9 断面⑤における Dr>0.3 での高水敷粗度係数の相対変化と流量及び水位の相対変化の平均値の関係

# 3. 高水敷粗度係数が水位と流量ハイドログラ フに及ぼす影響

高水敷粗度係数  $(n_{fp})$  が水位及び流量に及ぼす影響を明らかにするために,表-1 に示す case1~9 の  $n_{fp}$  を用いて,数値実験を行った.ここで,case5 の  $n_{fp}$  は前章で実験結果との比較により求められた値であり,以下ではこの値を基準値とよぶ.また,低水路粗度係数  $(n_{mc})$  については,全ケースにおいて前章で得られた  $n_{mc}$  =0.010 で一定とした.なお,上下流端での水位ハイドログラフは全ケースにおいて同一である.

図-8(a),(b)に,種々のn<sub>p</sub>に対する断面⑤の流量 及び水位ハイドログラフを示す.流量ハイドログラ フはn<sub>p</sub>の違いによって大きく変化しており,その変 化は Dr>0.3 で顕著である.また,その変化はピーク に近い程大きいという特徴を有している.対照的に, 水位ハイドログラフは,洪水の全期間を通して,n<sub>p</sub> の違いによる影響を殆ど受けていない.

高水敷粗度係数 n<sub>fp</sub> の変化が流量と水位に及ぼす 影響を詳しく検討する.図-9(a),(b)に断面⑤にお ける Dr>0.3 での n<sub>fp</sub>の変化に対する流量及び水位の 変化を示す.ここで,流量,水位の変化量を以下の ように定義する.流量及び水位の相対変化は,n<sub>fp</sub>の 基準値を与えた際のその時間における流量及び水位 との差を示しており、20秒ごとに算出した値を平均 している.  $\square -9$ より、 $n_{fp}$ の±20%の変化に対して、 流量の変化は約-10%~20%であり、明らかな相関 を有しているが、水位は、1%以下と微小であり、目 立った相関も見られない. このため、水位の相対変 化の比較から、適切な $n_{fp}$ を評価し、精度の高い流量 を推定することは困難であると言える.

そこで、*n<sub>p</sub>*の変化が洪水流の伝播に及ぼす影響を 検討する.図-10に種々の*n<sub>p</sub>*の解析結果におけるピ ーク水位の縦断位置と発生時刻の関係を示す.解析 結果は図-6 における断面平均値による算出法を採 用している.また、伝播特性の違いをわかりやすく 明示するため、縦軸は断面①~⑨間の縦断距離で、 横軸は断面①でのピーク時刻を0とし、それぞれ断 面①と断面⑨のピーク時刻の時間差で無次元化して いる.伝播特性は右に凸の形状を有し、*n<sub>p</sub>*が増加す るに従って凸部が突出するようになり、水位のピー クの到達時刻が遅くなっている.これは、*n<sub>p</sub>*の増加 により流速が減少したためであると考えられる.

図-11 に断面⑤を中心とした 1 波長区間でのピー ク付近(t=880s)における平面流速分布の比較を示 す. n<sub>fp</sub>の変化により,流れの向きや流速の分布特性 は大きく変化しないが,その大きさは n<sub>fp</sub>が増加する



程,全体的に減少している.この流速の減少は,高 水敷の広い区間で顕著に見られるが,低水路内でも 高水敷流れの影響を受けて流速が減少している.こ のため,前述したように主として低水路に沿って洪 水流が伝播されることを考慮すると,*n*<sub>f</sub>の変化に伴 う低水路内流速の変化は,洪水流の伝播に影響を及 ぼしていると言える.

以上のことから、ピーク水位の時空間データを正確に捉えることができれば、数値解析を介して、適切な n<sub>p</sub>を評価し、高精度の流量ハイドログラフを推定できることを示唆している.ただし、本実験では 洪水流の流下距離が十分でなく、中下流部では下流端(断面⑨)の影響を受ける形で、その違いが明確に示されたものの、その差は図-6の実験結果からも示されるように、実験結果の精度に比べて大きくない と考えられる.また、水位の実測値と解析値の一致には高い精度が要求されるため、今後、境界条件の 再現方法を主とし、さらなる解析法の改善が必要である.

流量ハイドログラフの観測値は、このような問題 を補う意味で重要な指標となる.図-8(a)から分かる ように、計算される流量は*n<sub>b</sub>*の違いにより変化する が、その変化には一定の規則性がある.このため、 粗度係数の推定には必ずしも洪水全期間での流量デ ータは必要ではない.即ち、洪水流量観測が減水期 でしか行うことができない場合にも、その一部のデ ータから数値解析を介して、粗度係数値の推定誤差 を小さくすることができ、流量ハイドログラフを十 分な精度で推定できると言える.

### 5. 結論

本論文では、水位の時空間データのみから洪水流 量を推定する手法の基礎段階として、複断面蛇行水 路の非定常流を対象に、高水敷粗度係数 n<sub>fp</sub>の大きさ の違いが流量、水位、洪水流の伝播に及ぼす影響を 検討した.以下に本論文で得られた主要な知見を整



図-11 種々の n<sub>fp</sub> による平面流速分布

理する.

- 実験データ及び解析結果から、本実験での洪水 流は、下流のゲート操作の影響を強く受けており、下流部では下流から上流に向って伝播していることを示した。
- 高水敷粗度係数 n<sub>fp</sub>の大きさの違いは、流量ハイ ドログラフに多大な影響を及ぼすが、水位ハイ ドログラフへの影響は小さい。
- 3) 高水敷粗度係数 n<sub>p</sub>の大きさの違いは、洪水流の 伝播速度、即ち、ピーク水位の縦断位置と発生 時刻に影響を及ぼす.そのため、この違いを正 確に捉えることで、適切な高水敷粗度係数 n<sub>p</sub> を評価し、水位の時空間データのみから洪水流 量を推定することができる.

#### 参考文献

- 1) 福岡捷二:洪水の水理と河道の設計法,森北出版,2005.
- 喜沢一史,井出康郎:河川流量観測における新計測 法の提案について,河川技術論文集,第7巻,pp.485 -490, 2001.
- 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, No.761/II-67, pp. 45-56, 2004.
- 4) 森下祐,渡邊明英,内田龍彦,河原能久:複断面蛇 行河道における洪水流の増水期と減水期の流れ構造, 応用力学論文集, Vol.9, pp.977-985, 2006.
- 5) 内田龍彦,河原能久:地形変化を有する二次元浅水流 の保存型 CIP 陽解法,応用力学論文集, Vol.9, pp.917-924, 2006.
- 6) 内田龍彦,河原能久,木梨行宏,伊藤康:デカルト座 標系を用いた市街地氾濫流シミュレータの構築と竹 原市の高潮氾濫への適用,水工学論文集,第51巻, pp.517-522,2007.