

河川合流部における下流端水位変動とマンニングの粗度係数に関する検討

A study on downstream water level fluctuations and Manning's roughness coefficient at the confluence of rivers

北見工業大学 ○学生員 五十嵐晃之 (Koji Ikarashi)
 北見工業大学 正員 吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
 寒地土木研究所 正員 伊波友生 (Yu Inami)
 寒地土木研究所 正員 山口里実 (Satomi Yamaguchi)

1. はじめに

近年、洪水時における河川合流部では、水位が上昇し河川が氾濫する事例が数多く確認されている。事例として令和2年7月豪雨により特別養護老人ホーム「千寿園」において14人が死亡した事例¹⁾が挙げられる。熊本県南部を流れる球磨川の水位が上昇したため、「千寿園」の東側を流れる球磨川支川の水位上昇を促し氾濫した。常呂川水系東亜川では、平成28年8月に合流部で水位上昇が発生²⁾した。札幌市を流れる豊平川においても、平成30年7月、9月、11月に河川合流部で水位上昇が観測³⁾されている。

災害対策・防災を強化するために社会インフラの整備が進められている。河川においても、治水力向上のために堤防の建設・強化が進んでいるが、都道府県や市が管理する河川では国が管理する一級河川に比べて整備が遅れている場合がある。今までは、支川の水位が上昇しても、本川に流入することにより、支川の氾濫は免れてきた。しかし、本川が強化されたことにより、従来よりも本川は高い水位に耐えられるようになったため、支川の流水が本川に流入できず、行き場を失った水が堰上げ背水（バックウォーター）となり支川を遡り、支川で氾濫が引き起こされていると推察できる。このように、洪水時の河川合流部の水位上昇の原因の一つとして、合流部で発生する堰上げ背水であると指摘されている。一方で、本川の水位上昇に伴い支川の下流端水位が上昇する場合は河床形態が変化するが、この下流端水位変動と河床形態に伴うマンニングの粗度係数の変動については、十分には検討されていない。

河川合流部は、洪水時に水位上昇が生じ、氾濫の危険性が高く、災害対策・防災などの観点からも非常に重要

な地点である。河川合流部の水位変動と河床形態に伴うマンニングの粗度係数に関する知見が求められている。しかし、洪水時の水位変動と河床形態の現地観測は、困難である。

本研究では、河川合流部における支川の下流端水位変動と河床形態に伴うマンニングの粗度係数の変動に関する知見を得るために、下流端水位を変化させた水理実験を実施して、縦断的な水位及びマンニングの粗度係数を測定した。そして、水量から推定される河床波の影響を考慮したマンニングの粗度係数を算出して、検討を実施した。

2. 下流端水位を変化させた河床変動実験

2.1 実験の概要

本研究で算出するマンニングの粗度係数の妥当性を検証するために、下流端水位を変化させた河床変動実験を3ケース実施した。実験概要を下記に示す。

実験水路は、図-1の全長34m（内移動床区間27.0m）、幅0.500m、深さ1.0mの水路を用いた。水路の側壁は兩岸とも厚さ10mmの亚克力透明板、底面はベニヤ合板で製作した。下流端には河床に対し20°、高さ0.75mの堰板を設置した。また、高さ0.300mの観音開きゲートを設置し、下流端の水位を調節可能にした。上流端には、整流機能を持たせるためにヘチマロンを設置し、ベルマウスを取り付けた。また、高さ約0.20mの固定堰を設置し、26m地点（給砂地点）には河床材料を敷き、高さ約0.20mに調節した。河床材料は、5号珪砂（粒径0.0515cm）を使用し通水時間は4時間、河床勾配は1/500とし、流量は30L/sと設定した。通水中は26m地点（給砂地点）において動的平衡が保たれるように給砂を実施し

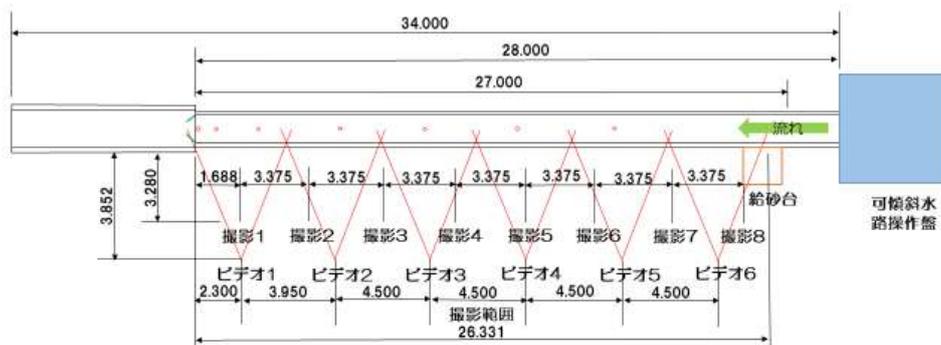


図-1 水路平面図（図中の単位はm）

た。実験時に発生した河床波を図-2に示す。

Case1は下流端において自由流出となる条件であり、この時下流端水位は0.06m、ゲート開度は完全開放とした。給砂量は292.8L、総掃流砂量は348.6L、水温は10.5°Cであった。

Case2は下流端の水深が等流水深となる条件であり、下流端水位は0.096m、ゲート開度は0.135mとした。給砂量は240L、総掃流砂量は246.9L、水温は14.5°Cであった。

Case3は下流端において水位が堰上がる条件とし、下流端水位は0.12m、ゲート開度は0.104mとした。給砂量は144L、総掃流砂量は80.7L、水温は13.0°Cであった。

実験は、十分な湿潤状態から開始するため、通水開始前に流量0.1L/sを与え湛水を行った。流量制御で目標流量に設定したのち、約3分で上流水槽の水位が安定した時点で実験を開始した。

水位・河床高を測定した。測定地点は下流端からの距離0.00m地点、1.00m地点、3.00m地点、6.33m地点、10.33m地点、15.00m地点、21.00m地点である。測定は開始から30分毎に実施し、4時間で計9回測定した。ただし、水面形は60分経過後からほとんど変化が確認されなかったため、60分時点でのデータを収束値とした。

2.2 実験結果

経過時間60分に測定した水位を図-3に、測定データより逆算したマンニングの粗度係数を図-4に示す。マンニングの粗度係数は、マンニングの平均流速公式を用いて算出した。エネルギー勾配の算出方法は、測定地点のエネルギー線を算出し、測定地点の隣接する2点の中点における勾配をエネルギー勾配とした。それに伴い流速、径深も同様に隣接する2点の中点における値を用いてマンニングの粗度係数を算出した。

図-4より、Case1のマンニングの粗度係数は3ケース中で一番低い。Case2のマンニングの粗度係数はCase1より高い。Case3のマンニングの粗度係数は下流では高い、上流かけ、マンニングの粗度係数が低下している。

実験時、目視により観測した河床波の形成傾向を述べる。Case1の下流では河床波はフラッシュされ、上流では河床波が形成されていた。Case2では、上流下流において河床波形成の定性的な特徴は確認できなかった。Case3は上流下流に関わらず、全区間に河床波が形成された。

3. 水理量から推定される河床波の影響を考慮したマンニングの粗度係数の算出

河川において正確に水位予測を行うためには、河床波の影響を考慮する必要がある。時間的かつ縦断的に変化する河床波に応じたマンニングの粗度係数を設定する必要がある。本研究ではその第一歩とし、河床波に応じたマンニングの粗度係数を算出し、定性的に表現できるか検討した。さらに、算出したマンニングの粗度係数を初期条件として与えて、再計算を行い、水位の再現性の検証を実施した。



Case1 自由流出 13.33 m～16.66 m 60分後



Case2 等流水深 18.00 m～20.66 m 60分後



Case3 堰上げ 20.66 m～24.66 m 60分後

図-2 実験時に発生した河床波 (側面から撮影)

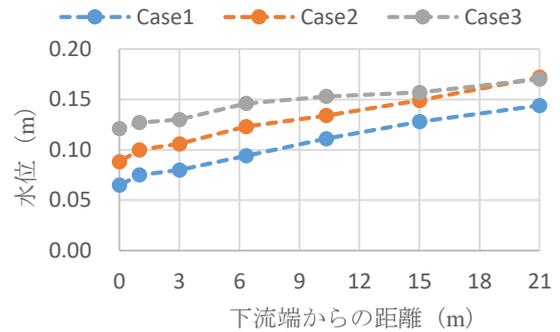


図-3 水位の縦断変化 (実験)

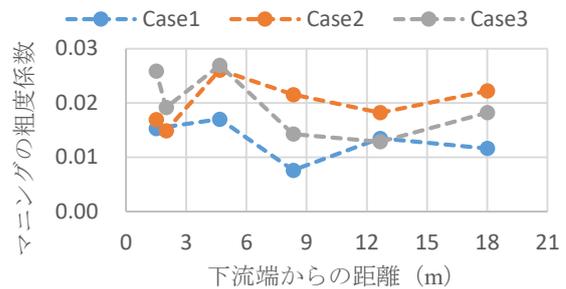


図-4 マンニングの粗度係数の縦断変化 (実験)

3.1 マンニングの粗度係数の算出方法

マンニングの平均流速公式を介さずに、水理量から推定される河床波の影響を考慮したマンニングの粗度係数を算出する手法を記す。

まず、河床形態に応じた無次元掃流力 τ^* を算出する方法を記す。既往論文⁴⁾より平均流速は次式で表される。

$$V = \sqrt{gR'I} \left[6.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{R'}{2d} \right) \right] \quad (1)$$

V (m/s): 平均流速, g (m/s²): 重力加速度 9.8m/s², I (無次元): エネルギー勾配, d (m): 粒径 (本検討においては0.00515cm), R' (m): 径深である。

式(1)を展開すると次式となる。

$$R' = \frac{V^2}{gI(6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R'}{2d})^2} \quad (2)$$

逐次的に R' を与えることで、式(2)の右辺と左辺の R' の差が0.0001以下となるような R' を得る。この R' を次式に代入して、無次元有効掃流力 τ^* を算出する。

$$\tau^* = \frac{R'I}{sd} \quad (3)$$

s (無次元)：砂の水中比重 1.65 である。

算出した無次元有効掃流力 τ^* を用いて、河床形態に応じた無次元掃流力 τ^* を算出し、流速定数 ϕ を算出した。本検討では、河床形態の遷移は、既往論文⁵⁾を参照して、砂堆河床 I → 遷移河床 I → 平坦河床 → 反砂堆河床とした。無次元掃流力 τ^* 、流速定数 ϕ を求める式は、既往論文^{4),5)}より次式を用いた。

・砂堆河床 I $\tau^* = \left(\frac{\tau^{*f}}{0.21}\right)^2 \quad (4)$

$$\phi = 2.4 \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{1}{6}} \tau^{*-\frac{1}{3}} \quad (5)$$

・遷移河床 I $\tau^* = \left(\frac{\tau^{*f}}{6.5 \times 10^7 \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{2}{5}}}\right)^{\frac{2}{11}} \quad (6)$

$$\phi = 1.1 \times 10^6 \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{3}{2}} \tau^{*3} \quad (7)$$

・平坦河床 $\tau^* = \tau^{*f} \quad (8)$

$$\phi = 6.9 \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (9)$$

・反砂堆河床 $\tau^* = \left(\frac{\tau^{*f}}{0.264 \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{1}{5}}}\right)^2 \quad (10)$

$$\phi = 2.8 \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{3}{10}} \tau^{*-\frac{1}{3}} \quad (11)$$

R (m)：径深である。 R は、流積÷潤辺として与えた。

各々の河床形態の交点は、 τ^{*f} で場合分けを行った。交点の式は既往論文⁴⁾より下記とする。

・砂堆河床 I - 遷移河床 I $\tau^{*f} = \frac{0.21^{10}}{(6.5 \times 10^7)^{\frac{1}{10}}} \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$

・遷移河床 I - 平坦河床 $\tau^{*f} = \left(\frac{1}{6.5 \times 10^7 \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{2}{5}}}\right)^{\frac{2}{9}} \quad (13)$

・平坦河床 - 反砂堆河床 $\tau^{*f} = 0.07 \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{2}{5}} \quad (14)$

算出した流速定数 ϕ を、既往論文⁵⁾より次式に代入し、マンニングの粗度係数 n を算出した。

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{\phi g^{\frac{1}{2}}} \quad (15)$$

3.2 算出したマンニングの粗度係数の妥当性の検証

1次元不定流計算モデルを用いて、初期のマンニングの粗度係数は0.015とし、河床変動無しの場合を実施した。計算により得られた水理量を基にして、上記の方法でマンニングの粗度係数を算出した。結果を図-5に示す。図-5より、Case1のマンニングの粗度係数は3ケース中一番低く、下流から上流にかけて値が高くなっている。実験の目視観測では、河床波は下流では形成されず、上流では形成されており、本検討の結果と実験での定性的な傾向は一致した。Case2のマンニングの粗度係数は、0.0174の一定値を示す。実験と同様にCase1より高い値を示している。Case3のマンニングの粗度係数は、下流では高く、上流にかけて低くなっている。本検討の結果と実験での定性的な傾向は一致した。

算出したマンニングの粗度係数を初期条件として、1次元不定流計算モデルに与えて水位を算出した。誤差評価としてRMSE(二乗平均平方根誤差)を用いた。真値を実験の測定値、予測値を計算値とし、単位はmとした。結果を表-1に示す。RMSEは、0.0143~0.0397の範囲であり、計算と実験での水位は定量的に一致した。

以上より、本研究で算出したマンニングの粗度係数は、定性的な傾向かつ定量的な水位を表現できることが推察された。水位の再現性については、表-1に示すRMSEの精度で再現できる。

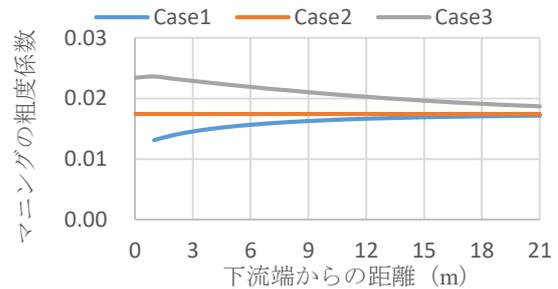


図-5 水理量から推定される河床波の影響を考慮したマンニングの粗度係数

表-1 実験と計算における水位比較 (値 RMSE)

	0分	30分	60分
CASE1	0.0143	0.0226	0.0267
CASE2	0.0386	0.0248	0.0353
CASE3	0.0397	0.0051	0.0088

3.3 下流端水位がマンニングの粗度係数の縦断変化に及ぼす影響

下流端の水位変動が河床形態に伴うマンニングの粗度係数に与える影響を明らかにするために、1次元不定流計算モデルの計算結果および本研究のマンニングの粗度係数の算出方法を用いて感度分析を実施した。

感度分析に用いた下流端水位は、低下背水である0.03m、0.06mの2ケース(M3曲線)、限界水深である0.07162mの1ケース、限界水深と等流水深の間である0.084mの1ケース(M2曲線)、等流水深である0.096mの1ケー

ス、堰上げ背水である 0.10m, 0.12m, 0.15m, 0.20m, 0.25m, 0.30m, 0.35m の 7 ケース (M1 曲線) の計 12 通りである。マンニングの粗度係数の初期値は 0.015 とした。また、縦断的な水位の収束値を求めるために、計算上の水路の長さを 200m とした。

水位の計算結果を図-6(1)に示し、マンニングの粗度係数を図-6(2)に示す。図-6(2)より、堰上げ背水の条件(下流端水位 0.10m~0.35m)において、マンニングの粗度係数はピークを持つ縦断変化となっている。このピーク地点は、下流端水位の上昇に伴い、上流へ移動している。このピーク地点について考察する。計算結果を見ると、このピーク地点の前後では、河床形態が変化している。ピーク地点より下流側は砂堆河床 I, 上流側は遷移河床 I である。無次元掃流力 τ^* を図-6(3)に示す。

ピーク地点下流の砂堆河床 I の区間では、図-6(3)より、 τ^* はピーク地点に向けて増加するため、 ϕ は式(5)より減少する。 ϕ の減少に伴い、マンニングの粗度係数は、式(15)より、下流からピーク地点に向けて増加したと考察できる。

ピーク地点上流の遷移河床 I の区間では、図-6(3)より、 τ^* は増加しつつ一定値に収束する。 τ^* は増加するため、 ϕ は式(7)より増加する。 ϕ の増加に伴い、マンニングの粗度係数は、式(15)より、ピーク地点から上流に向けて減少したと考察できる。

低下背水の条件(下流端水位 0.03~0.084m)では、図-6(2)より、下流端に近づくほどマンニングの粗度係数は小さい値を示した。河床形態は、河川全体では遷移河床 I であるが、下流端付近では平坦河床である。下流端付近は、低下背水の影響により、 τ^* が増加するため、 ϕ は式(7)と式(9)より増加する。 ϕ の増加に伴い、マンニングの粗度係数は、式(15)より減少すると考察できる。

4. まとめ

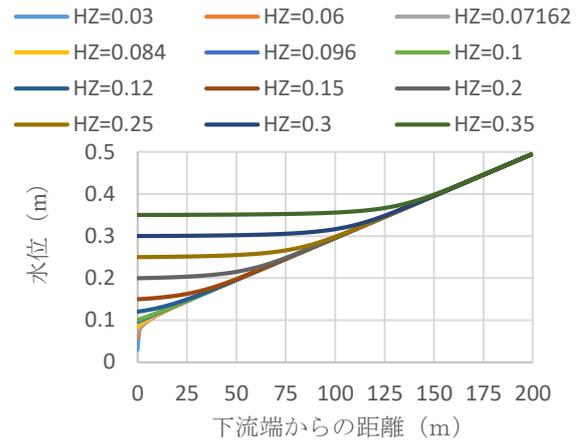
本研究による水量から推定される河床波の影響を考慮したマンニングの粗度係数を算出する手法の妥当性は、水理実験との比較から定性的な傾向かつ定量的な水位を表現できることが推察された。

1次元不定流計算モデルを用いた感度分析の結果、堰上げ背水の影響により、マンニングの粗度係数のピーク地点が、下流端水位の条件により上流へと変化することが示された。つまり、下流端水位の条件により、マンニングの粗度係数が高くなる危険箇所が変化することを示唆している。また、低下背水条件では、下流端付近でマンニングの粗度係数が低下する。この知見は、下流砂州のフラッシュの影響範囲などの、低下背水の影響範囲を考察するうえでの基礎資料となる。

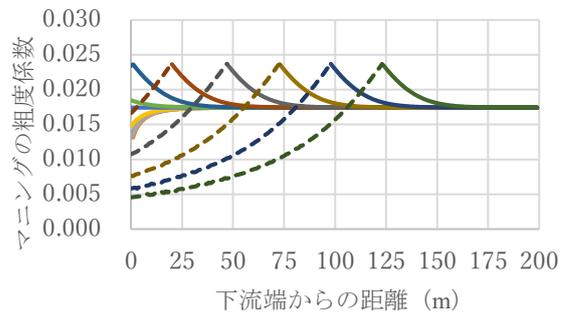
今後、河川合流部における河川の水位予測のための課題として、時間変化を考慮できる 1次元不定流計算モデルへの組み込みが必要である。

参考文献

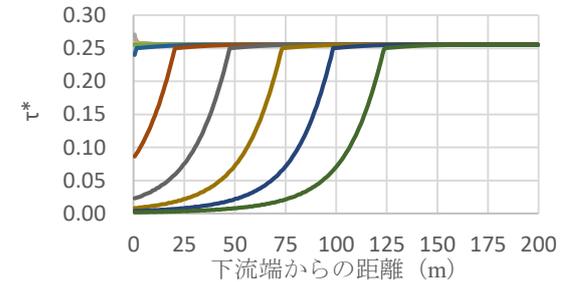
- 1) 朝日新聞デジタル <https://www.asahi.com/articles/ASN7B7H8PN7BPTIL008.html>, 2020年7月11日。
- 2) 前田俊一:平成28年8月北海道豪雨災害について



(1) 水位の縦断変化



(2) マニングの粗度係数の縦断変化



(3) τ^* の縦断変化

図-6 下流端水位変動とマンニングの粗度係数
(数値計算を用いた感度分析結果)

～主に堤防決壊と流路変動に焦点を当てて～、寒地土木研究所講演会資料, 2017年10月19日。

- 3) 伊波友生, 山口里実: 豊平川下流部における中小規模出水時の河床形状観測, 寒地土木研究所年報, 2019。
- 4) 岸力, 黒木幹男: 移動床流における河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告 67 巻, pp.1-23, 1973。
- 5) 吉川泰弘, 渡邊康玄: 1次不定流混合粒径河床変動計算におけるマンニングの粗度係数と交換層厚の検討, 寒地土木研究所月報 No.662, pp.11-20, 2008。