

山地河道における 水位の縦断分布に関する基礎的研究

小石 一字^{1*}・山田 正²

¹中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻（〒112-8551東京都文京区春日1-13-27）

²中央大学理工学部都市環境学科（〒112-8551東京都文京区春日1-13-27）

* E-mail: ichiu@civil.chuo-u.ac.jp

山地河道における水流に関しては未だ未解明な部分が多く、一般に屈曲や急縮拡、河床凹凸を繰り返す山地河道に既往最大流量が流れた際の水面形の解明は河川管理上重要である。この論文では、問題をシンプルにとらえ、狭窄水路の不定流（不等流）の水面形を、数値計算によって定性的かつ定量的にとらえるとともに、既往の理論との整合性を検証した。また、狭窄水路における不等流の水面形の形成過程における河道貯留効果を示した。

Key Words : *Unsteady flow, Steady flow, Flood flow, Mountain River, Regime shift, Storage effect*

1. はじめに

一般に溪流と呼ばれるような山地河道は、屈曲や急縮拡、河床凹凸を繰り返す河道形状を形成している。山地河道における水流に関しては、その水面形、抵抗則、河床形状、断面形状等、未だ詳細には明らかにされておらず、河川水理学としても解明が急がれる分野の一つである。また、河川行政における治水上の問題点の1つに、狭窄水路における上流方向の堰上げ背水が挙げられる。従来、山地域において河川計画はほとんど存在しなかったが、2011年には福島県を流れる只見川、和歌山県を流れる新宮川において既往最大流量がそれぞれ記録されており¹⁾、複雑な河道形状を有し、河道近隣に民家があることの多い山地河道に既往最大流量が流れた際の水面形の解明は、今後の河川計画や河川管理上重要であるといえよう。

本研究では、山地河道における水面形の解明に先立ち、問題をシンプルにとらえ、幅のみが変化する矩形の水路を流れる不定流（不等流）の水面形を、数値計算によって定性的かつ定量的にとらえるとともに、山田ら³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾の導出した狭窄部を有する開水路における水面形のレジーム図と照らし合わせることで既往の理論との整合性を検証した。また、狭窄部を有する河道での不等流の水面形の形成過程における流量の貯留効果を示した。

2. 狭窄水路における不定流の数値実験

(1) 不定流の数値計算に用いる基礎方程式と離散化手法

山地河道は掘り込み河道であることが多く、流れが一方方向に卓越していると考え、本研究では1次元解析を行う。1次元不定流の連続式と運動量方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha v Q)}{\partial x} = -gA \frac{\partial (h+z)}{\partial x} - \frac{gn^2 Q^2}{AR^{4/3}} \quad (2)$$

ここに、 h ：水深[m]、 A ：通水面積[m²]、 R ：径深[m]、 Q ：流量[m³s⁻¹]、 v ：断面平均流速[m²s⁻¹]、 α ：運動量補正係数($\alpha=0$)、 g ：重力加速度[m²s⁻²]、 z ：河床高さ[m]、 n ：Manningの粗度係数[m^{-1/3}s]である。抵抗則はManning則を用いて評価した。離散化手法は有限差分法を用い、時間微分は前進差分、空間微分は中心差分で離散化し、(2)式の移流項のみ風上化した。

(2) 数値実験条件

数値実験では、日本の山地河川を想定して勾配1/1000、延長20km、粗度係数0.02の一樣矩形断面河道を設定した。また、川幅は100m（一樣）とし、下流端から10km地点に水路幅縮小率10~60%の任意のパルス形状の狭窄部を設定した。ここに、水路幅縮小率は縮流前の水路幅に対する縮流

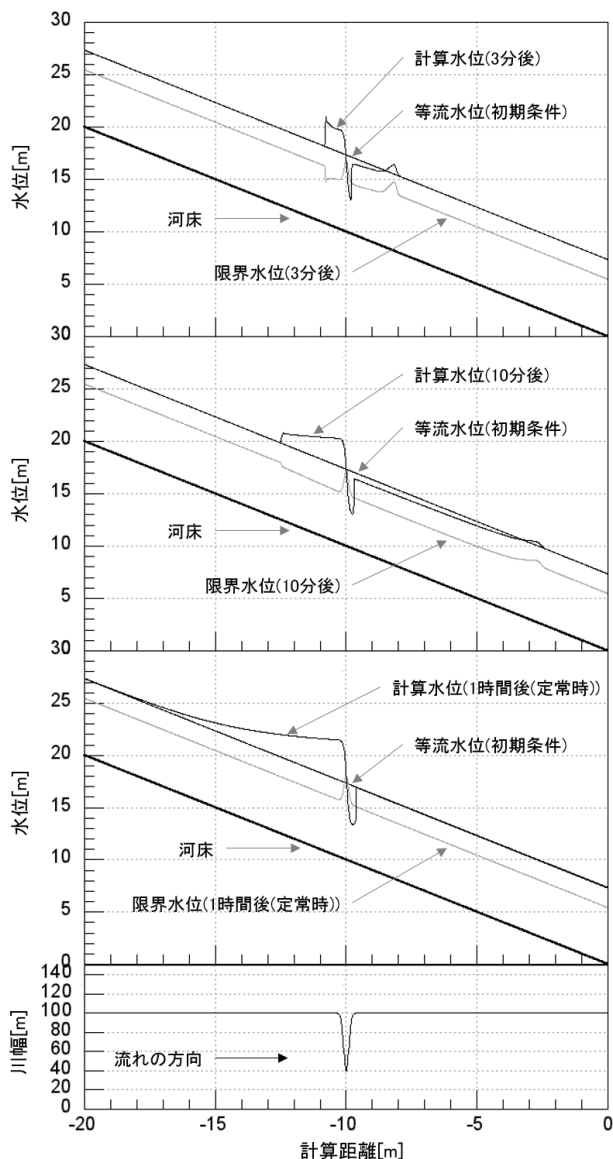


図-1 数値実験結果(ケース1)

初期条件として等流水深を与え、 $4000\text{m}^3/\text{s}$ の一定流量を流しつつ河道中央部において水路幅縮小率50%の狭窄部を瞬間的に出現させる実験。狭窄部上流側で流れの状態が常流から常流に接続する段波が発生し、狭窄部の下流側で流れがいったん射流となり、その下流で跳水を起こして下流の上流水深に接続している。

部の水路幅の割合を1から引いたものと定義する。

本研究では以下に示す4つのケースの実験を行った。
 ケース1：初期条件として等流水深を与え、一定流量を流しつつ河道中央部において瞬間的に狭窄部を出現させる実験、
 ケース2：狭窄水路において初期条件は不等流を計算し、上流から山型の流量ハイドログラフを与えて水面形の時間変化を見る実験、
 ケース3：下流端水位を一定値として固定し、標高の基準高に対して水平な等流水位を初期条件として与えたケース1と同様の実験、ケ

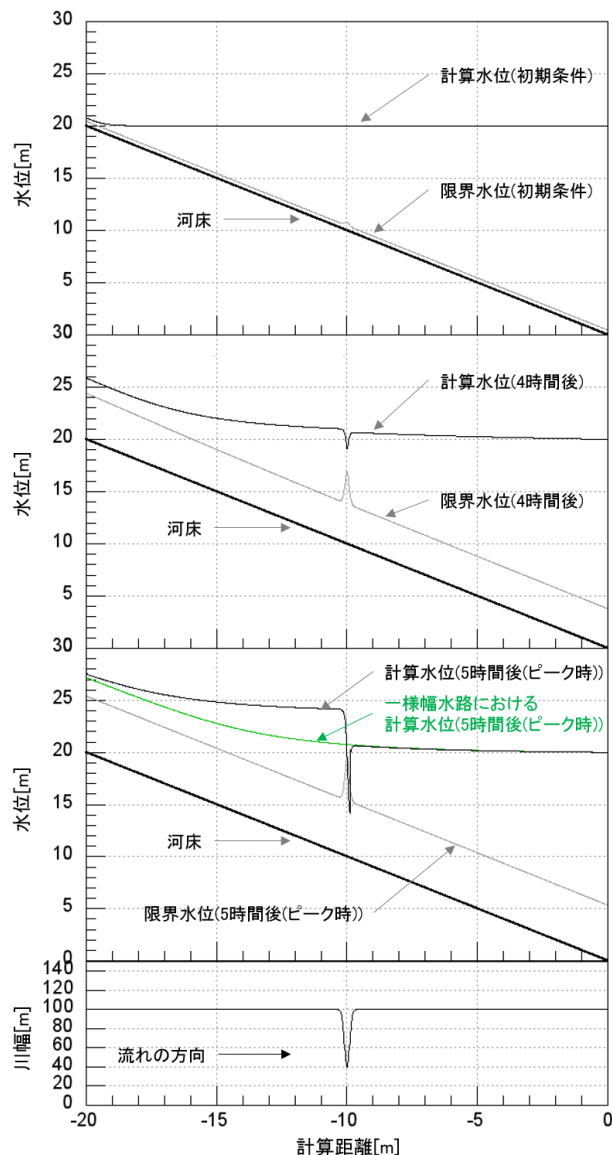


図-2 数値実験結果(ケース4)

下流端水位を一定値とし、標高の基準高に対して水平な等流水位を初期条件として与え、上流から基底流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 、5時間後にピーク流量 $5000\text{m}^3/\text{s}$ となる山型の流量ハイドログラフを与えて水面形の時間変化を見る実験。流量が上がるにつれて狭窄部上で下に凸な水面形となり、狭窄部上の水位が限界水位を下回るにつれて狭窄部上流側の水位が堰上げられている。

ケース4：下流端水位を一定値として固定し、標高の基準高に対して水平な等流水位を初期条件として与えたケース2と同様の実験。ケース3と4は下流端にダムによる水位の堰上げがある場合を想定した。

(3) 数値実験の結果、及びその考察

ケース1とケース4の数値計算結果を図-1、図-2に示す。ケース2とケース3の数値実験は本論文の趣旨を補完するものであるが紙面の都合上掲載を割愛する。ケース1で

は、 $4000\text{m}^3/\text{s}$ の一定流量を上流から流し、計算時間を定常状態の水面形を形成するのに十分な1時間として計算を行った。図-1は瞬間的に水路幅縮小率50%の狭窄部を出現させてから3分後、10分後、1時間後(定常状態)の計算水位と定常時の限界水位を示す。狭窄部が出現後、狭窄部の上流側で流れの状態が常流から常流に接続する段波が発生し、狭窄部より下流側でいったん限界水位を下回り、流れが射流となり、その下流で跳水が起き、流れが常流となって下流の水位に接続し、下流に伝播する衝撃波を伴いながら定常状態の水面形、すなわち不等流の水面形を形成していく。支配断面は最も水路幅の狭い地点に現れる。狭窄水路における不等流の水面形は、少なくとも水路幅が半分以上狭まる場合は狭窄部で流れが射流となるため、Froude数が1となる特異点を持つことから、数値解が連続的に求まらず、計算上困難が伴うことが分かる。

ケース2では、基底流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 、5時間後にピーク流量 $5000\text{m}^3/\text{s}$ となる山型の流量ハイドログラフを上流に与え、計算時間については下流端流量ハイドログラフが減衰し基底流量になるのに十分な17時間として計算を行った。図-2は水路幅縮小率が60%のときの結果である。図-2より4時間後の水位は狭窄部で下に凸な水面形となって流れは全区間で常流だが、流量が上がるにつれて狭窄部上の水位は限界水位を下回り、狭窄部上流側の水位は上昇し、狭窄部を境に不連続な水面形を形成する。ここで、流量ハイドログラフを与えたケース4の実験において狭窄部上流側でケース1のような段波は確認できないが、この場合は時々刻々と無限小段波が瞬間的に上流に伝播しているため狭窄部上流側で水位が上昇すると解釈できる。一樣幅水路における同様の実験におけるピーク水位と比較すると、狭窄部上で3m強の水位差がある。以上より、狭窄部を有する河道に大流量が流れた際には狭窄部より上流方向に堰上げ背水が起こりうることが分かる。したがって、屈曲や急縮拡、河床凹凸を繰り返す山地河道において既往最大流量が流れる際には、狭窄部によるそれまでよりも高い堰上げ背水が起こる可能性がありうる。

3. 既往の理論との整合性の検証

山田ら³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾は従来より狭窄部や河床凸部を有する開水路を対象に水面形とその遷移及び抵抗則に関して理論解析及び実験的検討を行ってきた。開水路の断面形状の変化による水面形の解析解は、Bernoulliの定理より断面形状変化部上流側のFroude数と水路形状を表す要素(無次元河床高、水路幅縮小率)を用いて表すことができ、水面形の成立破綻条件を解析的に明らかにすることで、

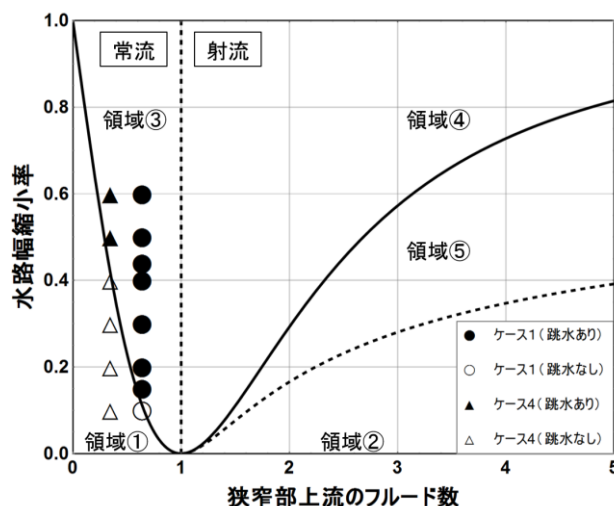


図-3 狭窄部を有する開水路における水面形のレジーム図とケース1とケース4の数値計算結果

領域①、領域②は段波や跳水の発生しない領域、領域③、領域④は段波や跳水の発生する領域、また、領域⑤は跳水発生の変移領域である。数値実験結果は理論とよく合っている。

段波や跳水の発生範囲を解析的に明らかにしている。

図-3に狭窄部を有する開水路における水面形のレジーム図とケース1とケース4の数値計算結果を示す。本研究では図-1、図-2に示す計算結果のほか、水路幅縮小率を任意に変えて数値実験を行った。縦軸に水路幅縮小率、横軸に狭窄部上流の段波の発生していない地点のFroude数(図-4の断面0におけるFroude数)をとっており、領域①、領域②は段波や跳水の発生しない領域、領域③、領域④は段波や跳水の発生する領域、また、領域⑤は跳水発生の変移領域である。数値実験結果と比較すると理論とよく一致していることが分かる。以上より本研究で行った数値実験と既往の理論との整合性を実証できた。

4. 狭窄部による河道貯留効果

図-4にケース1の数値実験における段波のイメージ図を示す。ここに、断面0は段波の発生していない断面、断面1は段波のフロントの断面、断面cは支配断面であり、 Q_0 と Q_1 、 Q_c 、 h_0 と h_1 、 h_c はそれぞれの断面における流量と水深を表している。このとき、支配断面における流量 Q_c は上流の流量で決まるわけではなく、限界水深より理論的に決まる流量である。連続条件により断面1における流量 Q_1 と支配断面における流量 Q_c は一致しており、断面1と断面cの区間において全水頭は等しいことから、断面1の水深は堰上げられる。このとき、断面1と断面cの流量は、断面0の流量に比べ小さくなっており、この関係は(3)式のように表わせる。

$$Q_0 > Q_1 = Q_0 \quad (3)$$

一定流量を流しつつ河道中央部において瞬間的に狭窄

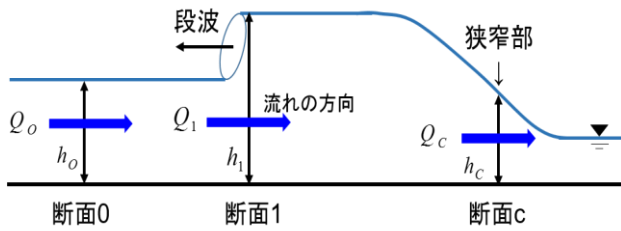


図-4 数値実験(ケース1)における段波のイメージ図
支配断面における流量 Q は限界水深より理論的に決まる流量である。連続条件により断面1における流量 Q と支配断面における流量 Q は一致しており、断面1と断面 c の区間において全水頭は等しいことから、断面1の水深は堰上げられる。

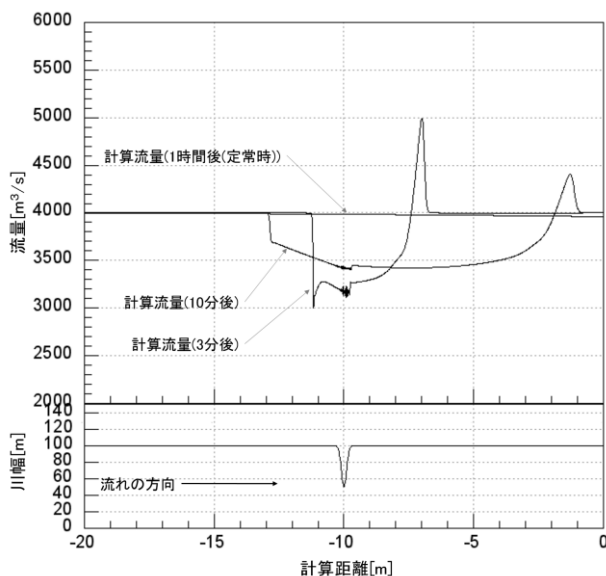


図-5 数値実験(ケース1)における流量の縦断分布図
狭窄部を中心に流量が小さくなっており、時間経過とともにその影響が上下流に伝播し、十分時間がたつと元の一定流量に戻っていく。狭窄部下流側では狭窄部の出現による衝撃波が下流に伝播している。

部を出現させるケース1の数値実験における流量の縦断分布を図-5に示す。狭窄部が出現して3分後の流量は狭窄部を中心に約 $1500m^3/s$ 小さくなっており、時間経過とともにその影響を上下流に伝え、狭窄部を中心に流量を下げていき、十分時間がたつと元の定常状態の一定流量になることが分かる。また、狭窄部下流側では狭窄部の出現による衝撃波が下流に伝播している。著者らは、河道内の狭窄部による流量の貯留効果を河道貯留効果と呼んでいる。一般に河道貯留効果は、ダムによる貯留効果を指すことがあるが、狭窄部も流量を貯留する効果をもつ。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 狭窄水路における不等流の水面形成過程において、狭窄部上流側で流れの状態が常流から常流に接続する段波が発生し、狭窄部の下流側で流れが射流となり、その下流で跳水を起こして下流の常流水深に接続する。
- 2) 下流端で水位が堰上げられた狭窄水路に上流から流量ハイドログラフを与えた場合、流量が上がるにつれて狭窄部上で下に凸な水面形となり、狭窄部上の水位が限界水位を下回るにつれて狭窄部上流側の水位が堰上げられている。これは、時々刻々と無限小段波が瞬間的に上流に伝播しているため狭窄部上流側で水位が上昇すると解釈できる。
- 3) 狭窄部を有する河道に大流量が流れた際には上流方向の堰上げ背水が起こりうるため、屈曲や急縮拡、河床凹凸を繰り返す山地河道において既往最大流量が流れる際には、狭窄部によるそれまでよりも高い堰上げ背水が起こる可能性がありうる。
- 4) 本研究で行った数値実験結果は山田らによって導出された既往の理論をよく説明しており、理論の妥当性を補完するものであった。
- 5) 狭窄部を有する河道における不等流の水面形の形成過程における流量の河道貯留効果を示した。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会東北支部：平成23年7月新潟・福島豪雨に関する阿賀野川水系技術検討会報告書，2012。
- 2) ダム操作に関する技術検討会：ダム操作の運用改善に向けた中間報告書，2012。
- 3) 山田正，水子龍彦，竹本典道：山地河道の水面形遷移に関する研究，土木学会第44回北海道支部論文報告集，pp. 293-298，1988。
- 4) 山田正，池内正幸，村上良宏：溪流を模擬した開水路流れの水面形遷移と抵抗則に関する研究，第30回水理講演会論文集，pp. 73-78，1986。
- 5) 高木隆一，佐藤直良，山田正：幅の変化する水路(狭窄、拡幅)を流れる不等流の水面形の解析解，第60回土木学会関東支部年次研究発表会講演概要集，Vol.13，pp. 131-132，1986。
- 6) Quimpo, M. and Yamada, T.: General Hydraulic Characteristics of an Open Channel with Narrow Path, Proceeding of World Environmental and Water Resources Congress 2009: 1-10. doi: 10.1061/41036(342)273. 2009。
- 7) 銭潮潮，山田正：開水路断面の不均一性に起因する不等流の水面形成に関する基礎的研究，水利科学 別冊，No.336(第58巻第1号)，pp. 65-99，2014。