

断面の急変する急流河川に先鋭な 流量ハイドログラフが流下した場合の水理現象

STUDY ON HYDRAULIC PHENOMENA IN STEEP SMALL RIVERS

藤堂 正樹¹・浜口 憲一郎¹・福岡 捷二²

Masaki TODO, Kenichirou HAMAGUCHI and Shoji FUKUOKA

¹ 正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

² フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 工学研究科環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

Hydrographs of steep small rivers with drainage areas of several hundreds square kilometers tend to be characterized by sharp peaks. It is generally known that in a river section consisting of a succession of sharp bends or of sharp widenings or constrictions, distinctive phenomena due to the river's unique channel characteristics occur.

In this study, experiments are conducted to compare the case that flush flood is discharged with the case that steady flow is discharged, using a hydraulic model which has such characteristics as steep small rivers. Following the results, external force computations of velocity and tractive force with the calculation of movable bed of quasi-three dimensions. Attention is paid to the phenomena of sediment transportation and water level fluctuation, and the effects of channel alignment and discharge conditions are considered. As the result, important notice in the steep small river channel projects is indicated.

Key Words : sharp hydrograph, smaller rivers, sharp bends, sharp widenings or constrictions, aggradation or degradation

1. 目的

流域面積が数百 km² 以下程度の急流中小河川では、峡谷等の存在を原因とする狭窄部と、その上流側に土砂堆積によって形成される比較的幅広い拡幅部とが連続する地形が随所に見られる。水理的に表現すれば、急縮部と急拡部の連続する平面形状と言える。加えて、このような河川では流域面積が小さく急勾配であることから、流出時間が短く、一般に流量ハイドログラフは先鋭的となる性質がある。このため河道の平面形、横断形や河床の粗度変化とも相まって特徴的な水位変動や急激な土砂移動が生じることが知られている。^{1) 2)}

著者らは前報³⁾において、急拡・急縮部の連続する平面形状の実河川水理模型を用いて、先鋭的な流量ハイドログラフを流下させた場合に、それぞれの断面で生じる急激な河床及び水位の変動を確認し、考察を加えた。

本報では先鋭的な流量ハイドログラフの効果をより明らかにするために、定常流を流下させた場合の実験を行い、比較を行った。また、移動床の準3次元解析モデルを作成し、ハイドログラフ及び定常流を与えて水面形、流速、河床変動量、無次元掃流力等の縦断的、経時的変化を把握した。解析結果と既往実験結果とを併せて、流

量等の外力要因の変化に伴う水面形、流速、洗掘深等の発生機構を明らかにするとともに、中小河川計画^{4) 5)}への反映を考えることを目的としている。

本報の着眼点は次の3点に集約される。

- 平面的な急拡・急縮+先鋭的なハイドロ が同時生起する場での現象把握
- 急流中小河川の現象を数値計算で解く場合の留意点の明確化
- 急流中小河川の河道計画を行う場合の留意点の明確化

2. 定常流とハイドログラフ流下の比較実験

(1) 実験水路

実験水路は、図1に示すような複雑な平面形、特に急湾曲部と急拡・急縮部とが連続する河床勾配 1/100 程度の急流中小河川を縮尺 1/50 でモデル化した河道である。測定区間の延長は 20m である。上流側に同距離の助走区間が存在する。この区間は給砂区間として扱った。

河床材料は実河川を基にした混合粒径分布を与えた。河道内には人工的な高水敷は造成されておらず、横断形はほぼ単断面と見なすことができる。模型と実河川の水理諸元値を表1に、模型平面図を図1示す。

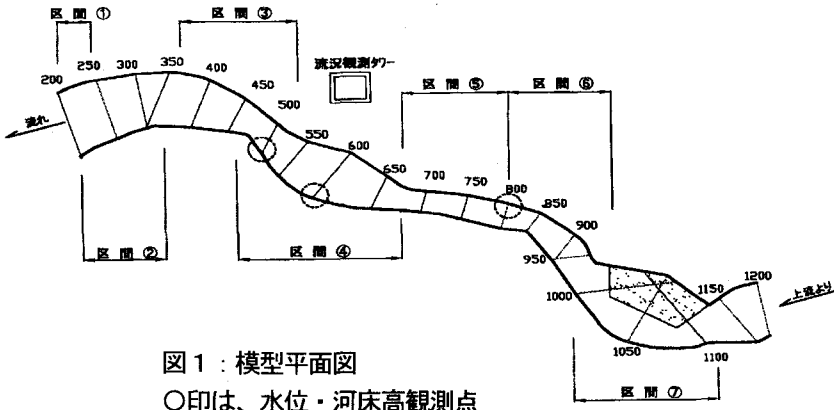


図1：模型平面図
○印は、水位・河床高観測点

表1：実験水路の諸元

項目	模型諸元
模型縮尺	1/50
河川延長	約 50m
河道幅	約 0.6~1.6m
時間スケール	約 1/7
平均河床勾配	1/100
河床材平均粒径	1.2mm
粒子レイブルズ数	760~1100
河床材料比重	2.64
粗度係数n	0.020~0.025 (実験結果)

※ 実験の初期河床は、平坦に生成した河床上に、実河川の平均年最大流量相当を15分流下させて製作した。

(2) 流量条件

実験、及び後述の数値計算の対象流量は、図2に示すハイドログラフと定常流2ケースの計3ケースである。

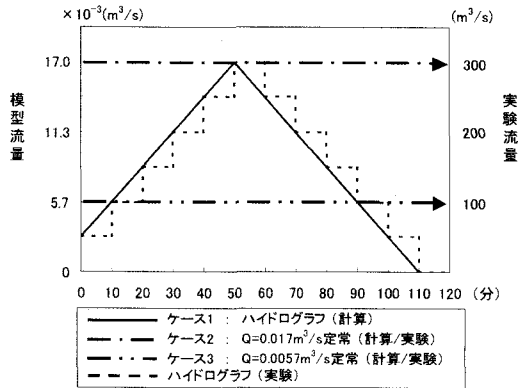


図2：実験及び数値計算の流量条件

(3) 観測項目

本実験水路を図1に示すように7つの区間に分割した。このうち、急拡/急縮部の連続区間：区間④：SP500~600、急湾曲区間：区間⑥：SP800~900 に着目して、

以下の項目の観測をおこなった。

- ・ 水位の経時計測
- ・ 河床高の経時計測
- ・ 表面流速の経時計測
- ・ 砂州の消長等の観測

水位及び河床高変動は、みお筋部と目される箇所(図1の○印の箇所)を対象に砂面計を用いて測定した。

(4) 実験結果

ハイドログラフ流下実験の結果は、前報³⁾に記した。以下では定常実験の水位・河床高の観測結果を基にハイドログラフ流下実験との比較を行う。なお、流況等については、後述の数値計算の項で述べる。

図3は、急拡・急縮・急湾曲という特性を持つ代表的な断面の水位と河床高の経時変化である。図の左列に示すハイドロ実験では、急拡部 SP600 で増水時の河床堆積と減水時の河床低下傾向が生じ、直下流急縮部 SP500 では増水時の急激な河床低下と減水時の急激な埋め戻しなどの特徴的な現象が生じているのが判る。これらの現象はハイドロ流下の効果であり、定常流実験では顕著には現れてこない。

また、定常流実験であっても水位・河床高はハイドロ時の傾向に似た緩やかな経時変化を示す。その変化量は流量規模によって差異がある。例えば 0.017m³/s 流下時の急拡部 SP600 の河床と水位の上昇は比較的大きい。これは上下流断面の平面形に起因する掃流力の差異によるもので、当該断面では流砂量が平衡状態にないことを示すものである。

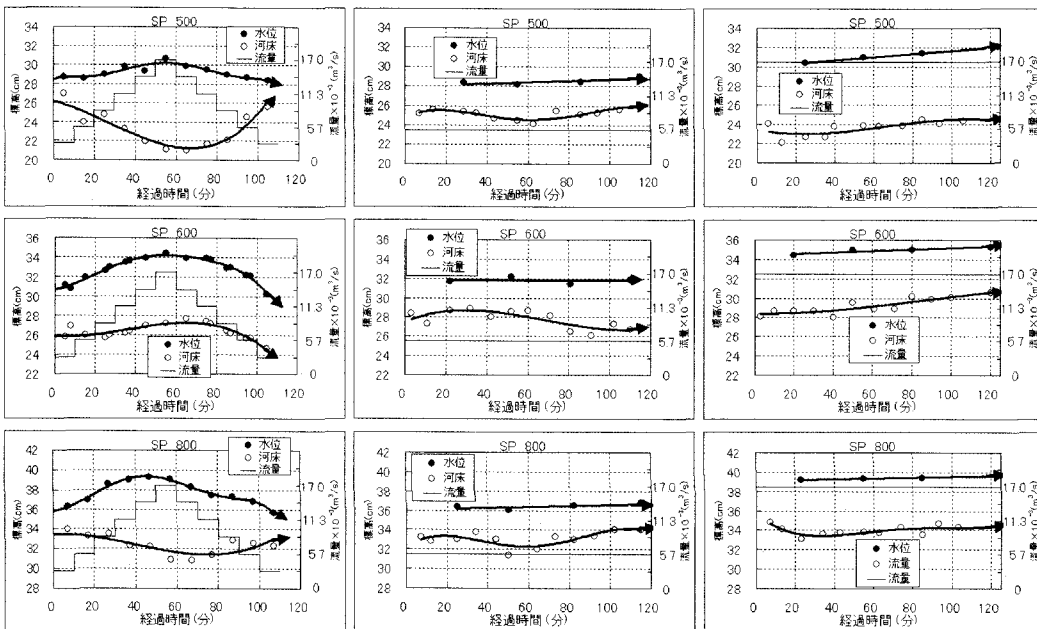


図3：各断面みお筋部の水位および河床高の変動

左：ハイドロ流下時(ケース1)、中央：定常0.0057m³/s(ケース2)、右：定常0.017m³/s(ケース3)
上からSP500(急縮)、SP600(急拡)、SP800(急湾曲)の各断面

表2： 実験から得られた事柄

ハイドログラフ実験	「各断面の平面形状変化+急激な流量変動」により、各断面で水位・河床高は異なった変動を示す。 ・急縮 (SP500) の河床高は増水時に最大 4.8cm 洗掘、減水時に 4.4cm 埋め戻し。水位は、若干上昇傾向を示すが概ね一定。流量増減と水深増減が同一傾向となる。 ・急拡 (SP600) の河床高は、増水時に最大 1.2cm 上昇、減水時に 2.6cm 低下。水位は、流量の増減に応じて変化する。この断面のみお筋では水深がほぼ一定。 ・湾曲 (SP800) も河床高は、増水時に 2.6cm 洗掘、減水時に 2.0cm 埋め戻し。河床高の変動は急縮部のみお筋ほど顕著ではない。水位は、急縮部と同様に、流量増減と同一傾向となる。
定常流実験	実験初期段階では、断面の急拡・急縮特性に応じてハイドロ実験と同一の河床変動傾向を示す。その変動値は流量規模に関係するが、ハイドロ実験よりも変動幅はかなり小さく経時変化と共に一定値に向かう。従ってピーク時の洗掘深は、ハイドロ実験の方がかなり大きい。
現象の時間遅れ	ハイドロ実験では、流量ピークに少し遅れて (模型時間で 10 分程度)、最深河床高のピークが生じる。

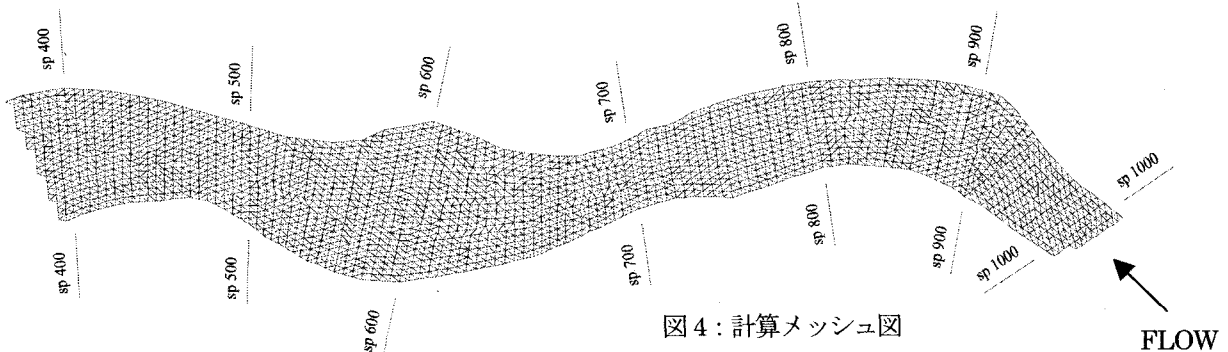


図4：計算メッシュ図

3. 数値計算による実験の再現

(1) 計算手法

実験水路の SP300～SP1500 までの約 24m 区間を対象に、流れの計算と流砂の計算を実施した。

流れの基礎式は XYZ 方向の Reynolds 方程式と連続の式である。方程式の離散化は、空間的には FEM により展開を行い、時間変数に対しては二段階陽的解法及び Runge-Kutta 法により展開している。FEM によるメッシュ分割を採用することで、急拡・急縮の生じる平面線形が無理なく再現でき、計算の安定にも繋がるかと判断した。1メッシュのサイズは、1辺が 4～8cm の可変長三角形である。計算に用いたメッシュ図の一部を図4に示す。流れの計算では鉛直方向の運動方程式に対しては、静水圧分布を仮定した準3次元解析手法とした。流砂量の計算は、縦断方向に Meyer-Peter-Müller 式、横断方向に長谷川式を用いた。河床材料は一様粒径 $d = 1.2\text{mm}$ を与えた。

流量条件は、図2に示す実験ケースと同様にハイドログラフ1ケース、定常流2ケースを行った。

急流河川模型の水理現象は、浅くて速い流れの再現がポイントとなることから、以下の点に留意した。

先鋭的なハイドログラフを計算で流下させる過程では水深が極端に薄くなったり、土砂移動や流量増減を契機として、水面上に砂州が現れる場合がある。このような際には近傍のメッシュで急激な流速増減が生じ計算が不安定となる。本解析ではこれを防ぐために、計算時間ピッチを最大 2/1000 秒まで細かくした。

(2) 計算モデルのキャリブレーション

計算モデルに用いる粗度係数は、模型の水位を真値として水位合わせによって求めた。水位と河床高の実験値に最も近似する値として、 $Q=0.0057\text{m}^3/\text{s}$ では $n=0.025$ 、 $Q=0.017\text{m}^3/\text{s}$ では $n=0.020$ が適合する結果となり、定常計算ではそれぞれこの粗度係数を与えた。図5は、 $Q=0.0057\text{m}^3/\text{s}$ では $n=0.025$ の場合の実験値との比較図である。なお、計算開始時の初期河床は、各断面とも実験開始時点の河床高と同様の条件とした。

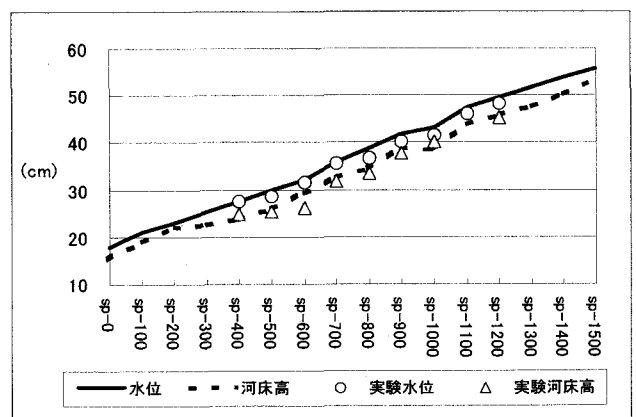


図5：水位、河床高のキャリブレーション

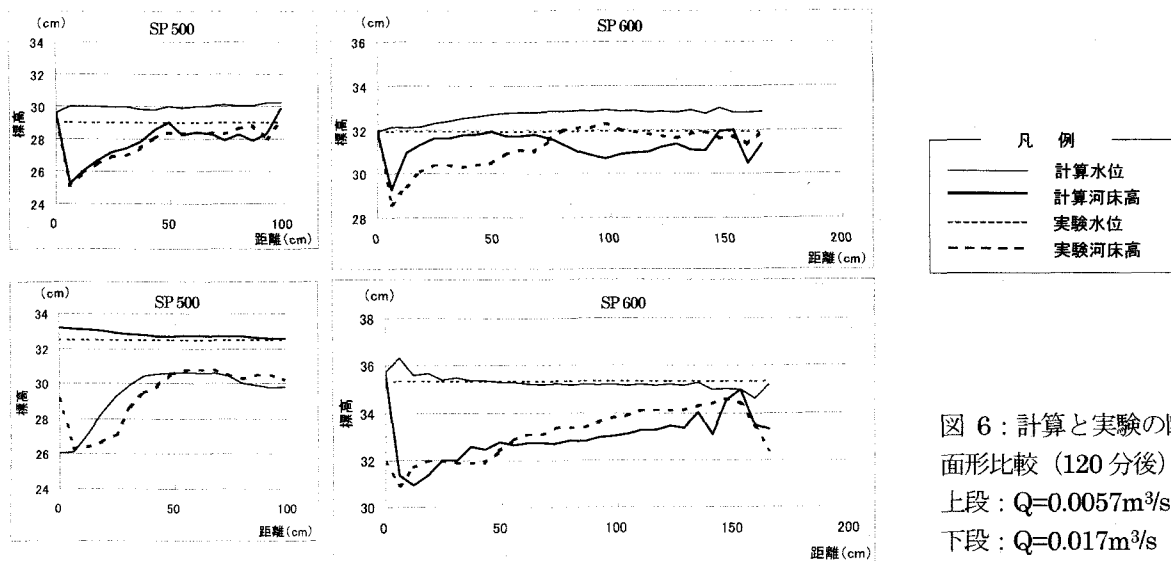


図 6 : 計算と実験の断面形状比較 (120 分後)
 上段 : $Q=0.0057\text{m}^3/\text{s}$
 下段 : $Q=0.017\text{m}^3/\text{s}$

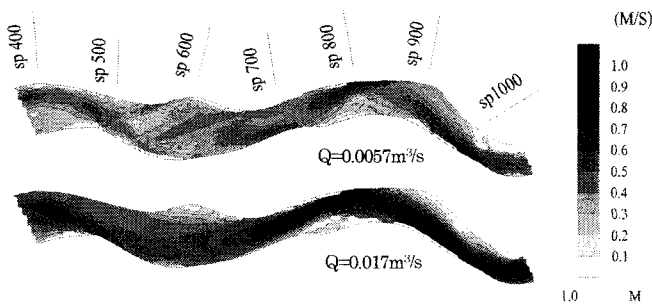


図 7 流速コンター (計算結果)

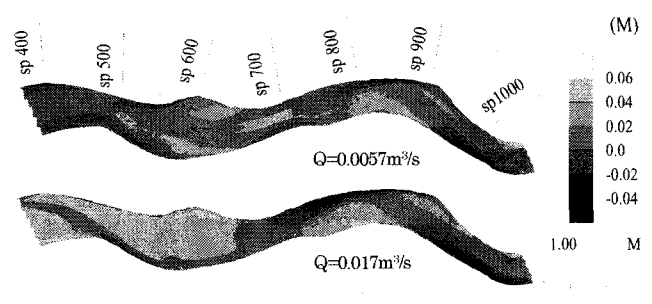


図 8 河床変動量コンター (計算結果)



図 9 無次元掃断力コンター (計算結果)

(3) 定常流を対象とした解析と実験の比較

粗度検証を行った後に、流量 $0.017\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.0057\text{m}^3/\text{s}$ の定常流計算を 120 分間実行した。計算結果と定常流実験時のデータについて、以下の項目を比較した。

- ・断面経時変化
- ・流速コンター
- ・初期河床からの河床変動コンター
- ・無次元掃断力 τ_* コンター

定常流計算より得られる 120 分後の急縮・急拡部の横断形状を図 6 に示す。破線は実験値である。洗掘、堆積場の傾向は概ね再現できているが、 $Q=0.017\text{m}^3/\text{s}$ のケースの方がより良好である。その原因には水深が関係しているものと思われる。計算の適合性・安定性と言う観点からは水深の浅い急流では定常流計算でも困難が伴う。

定常流実験では、縦断的に見込みお筋位置に顕著な経時変化は認められず、計算でもこの点は確認できた。120 分後のお筋位置は、図 7 の流速コンターの大きい箇所と考えれば、SP800～SP700 にかけては右岸側、SP600～SP500 にかけて左岸側に移行する。これは実験

結果を再現している。

なお、各断面では河床変動が生じており、その大きさは流量規模と継続時間に関係する。例えば急拡部 SP600 の横断面では、 $Q=0.017\text{m}^3/\text{s}$ の場合は $Q=0.0057\text{m}^3/\text{s}$ に比べて、1～2cm 程度高い河床高となっている。この点は、河床変動コンター図からも判る。

その原因は、断面間の掃流力の差異による。図 9 は、計算結果を基に河床の無次元掃流力 τ_* コンターを描いたものである。SP600 断面が堆積場となることは τ_* コンターからも明らかである。いずれの流量の場合も τ_* は、上流 SP800～SP700 付近で最大値となり、SP600 地点にかけて低下している。これは、上流 SP1000～SP800 にかけて直進する流れが SP800 右岸で急湾曲するため左岸に堆積場が生じていることが影響している。この結果、みお筋幅が狭まり τ_* が上昇するものと考えられる。急縮・急拡部のみを論ずるのではなく、上流側の線形形状も重要な影響要因となることが判る。

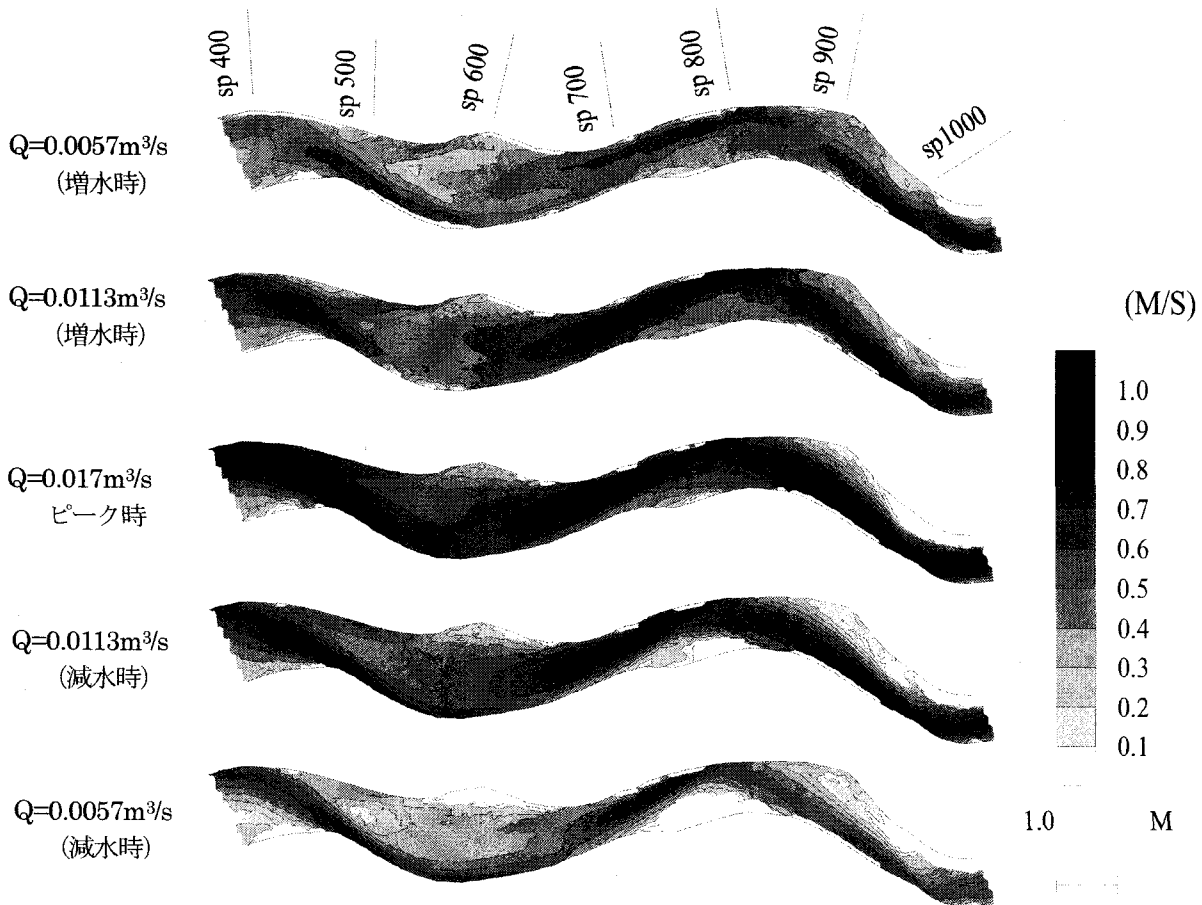


図 10 流速コンター (計算結果)

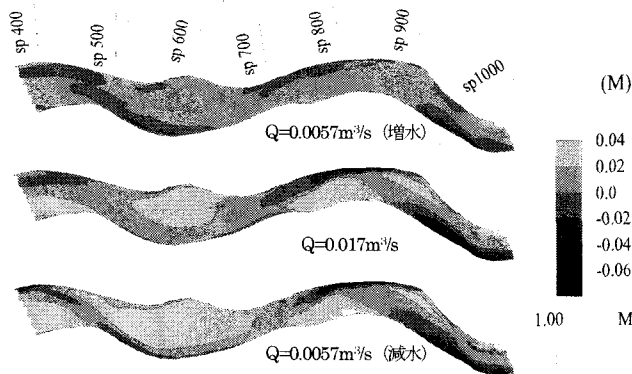


図 11 河床変動量コンター (計算結果)

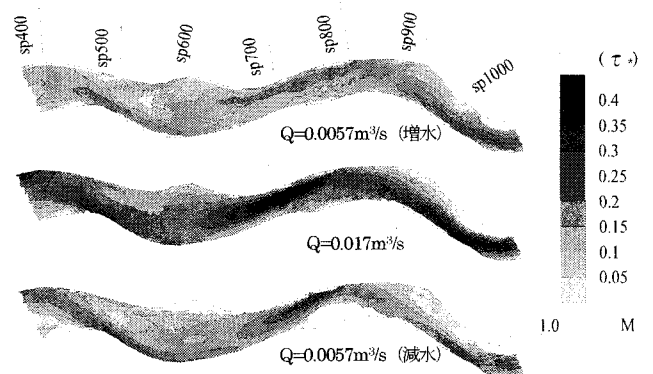


図 12 無次元掃流力コンター (計算結果)

(4) ハイドログラフ流下時の解析結果

定常流計算でモデルの精度を確認したうえで、ハイドログラフ流下計算を行った。

図 10 は、各流量段階での流速コンターであり、実験時のみお筋を再現した結果となっている。

同一断面の同一流量であっても、増水時と減水時では流速はもとより、河床高、 τ_* は異なる値となる。例えば SP600、SP800 の $Q=0.0057\text{m}^3/\text{s}$ (増水時、減水時) を比較すれば明らかである。差異を生む大きな要因はピーク流量やハイドログラフ形状の履歴を受けているか否かにあると推察される。同一地点であれば流量増加と共にみお筋部が形成されていく。ピーク時の流速コンターから類推すると、みお筋の縦断形状は、小流量時に

比べてより直線的な流れとなっていると判断できる。その後、減水時にはピーク流量時のみお筋部が残るため、直線的な流れを呈しながら、流速の遅くなる内岸側で堆積が生じるようになる。図 11 から SP800 の左岸側、SP600 の右岸側等はこれに相当することが判る。

洗堀場の特定は重要である。断面間の掃流力の差分が大きい場合ほど洗堀、堆積の生じやすいことは自明である。図 12 から、これに該当するのが、SP800~SP700 右岸の湾曲部外岸、SP500 付近の左岸である。特に SP500 は急拡部 SP600 の直下流であり、上流断面との τ_* の差異が大きいところと考えられる。これは実験結果から明らかであり、計算の河床高変動コンターでもピーク流量付近で洗堀の生じていることが確認できる。

4. 結論

(1) 平面形状がもたらす影響

急拡・急縮断面に先鋭なハイドログラフが流下した場合には、各断面特性に応じた水位、河床高の急激な変動が生じる。その要因の第一は平面形の急変と考えられる。この観点からは、急拡部から急縮部にかけての洗掘が指摘できる。ハイドログラフを流下させた場合、洗掘はより急激となる。本報では、SP500 断面の現象がこれに相当する。このことは、実験による断面の経時測定及び数値計算の τ_* からも説明ができる。水位、河床高の変動が生じるのは急縮・急拡場だけではない。急湾曲部では、流量ピーク時以降内岸側に土砂堆積を生じる。この結果、みお筋幅が狭くなり結果的に急縮部のような形状を呈し、下流断面では掃流力差によって堆積傾向となる。本実験及び数値計算の対象区間では SP900～SP700 にかけての断面がこれに相当した。

(2) 先鋭なハイドログラフがもたらす影響

急拡・急縮部に定常流が流下した場合でも同一断面であればハイドログラフ流下時と同様の河床変動傾向を示すが、その変動量は緩やかである。ダイナミックな変動はハイドログラフのもたらす効果である。

ハイドログラフ流下時には、同一流量であっても増水時と減水時とでは、水位・河床高の変動が異なる。これはピーク流量やハイドログラフ形状のもたらす履歴の効き方によるところが大きいと判断できる。今回の数値計算結果からは、みお筋の縦断形状は、ピーク流量時には初期段階に比してより直線的な流れとなっていると判断できる。減水時にはピーク時の直線的なみお筋の影響を受けながら洗掘、堆積が生じるため、増水時の同一流量とは異なる現象となるものと考えられる。

(3) 数値計算による実験の再現性

本報のような浅くて速い流れの場を数値計算によって再現することは困難を伴う。本報告では、メッシュサイズがほぼ一様となるように FEM 手法を採用し、計算時間ピッチを 2/1000 秒精度とすることで安定した計算を行うことができた。

この結果、定常流計算においては実験結果を概ね再現できたものと考えられる。

その際、薄い流れの粗度係数の設定は重要である。本報では流れの抵抗則も考慮のうえ、実験による測定値を真値とした逆算によってこれを確認した。

(4) 河道計画への反映

河道計画への反映という観点からは2点指摘できる。

第1は、河床変動である。急拡・急縮場での水位変動を規定しているのは、土砂移動であり、断面急変に伴なう断面間の掃流力差であることが明らかとなった。一方

でこうした特有の現象が生じる急流中小河川の河道計画についての技術書⁴⁾⁵⁾はわずかであり、これまでは大河川の計画手法が準用されることが多かった。しかし、急流中小河川では、洪水ハイドログラフ形状、河道の線形、断面形状も大河川とは異なるものであり、中小河川特有の現象を反映した河道計画手法が必要となってきた。

特に河床変動が護岸基礎、橋脚、堰・床止め等の横断工作物等に及ぼす影響が懸念される。この場合、洪水時の最大洗掘深と同時に、その後の埋め戻しの有無、洗掘の継続時間が問題となる。これらはハイドログラフの形状に依存するため、数値計算などによって様々なパターンのハイドログラフ流下時の現象把握に努めることが重要である。また、短時間の洗掘であれば大きな問題にならない可能性もあるが、一方で護岸の基礎洗掘を契機として基礎部から吸出し現象は生じないか、複数の洗掘履歴が生じている場合はどう扱うべきか等、解析の結果と現地情報と合わせた考察が必要となる。この点については、今後現地調査により明らかにしていく予定である。

第2は、抵抗則の変化である。本実験によっても、粗度係数は流量規模に応じて変化することが確認できた。粗度係数変化の要因として、河床波の形状抵抗が挙げられる。河川技術者が良く用いる抵抗則⁴⁾に流速係数 ϕ がある。 ϕ は、無次元掃流力 τ_* とこれに応じた河床形態によって概ね定まる。河道計画を行う際は、河床波の見極めが問題となる。急流河川では、河床形態が先鋭なハイドログラフの変動に追随しているかどうかの見極めが難しいことに加え、計画規模の流量では、本解析のように ϕ の遷移領域となる可能性がある。したがって、可能であれば出水痕跡等を調査の上、粗度の逆算を行うことが望まれる。

謝辞：本論文作成にあたり、パシフィックコンサルタンツ(株)の熊谷利彦氏、蒲生嶺行氏、平林政徳氏にご協力いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所河川研究室、保津峡上流部水理模型実験報告書、昭和60年10月、土研資料2316号
- 2) 建設省土木研究所河川研究室、最上川大淀地区の河道計画に関する検討、平成7年3月、土研資料3326号
- 3) 藤堂正樹、浜口憲一郎、福岡捷三、先鋭的な出水特性を持つ中小河川の水理現象、平成14年6月、土木学会河川技術シンポジウム論文集
- 4) 中小河川計画検討会、中小河川計画の手引き(案)、平成11年9月
- 5) 社団法人全国防災協会、美しい山河を守る災害復旧基本方針、平成14年6月

(2003. 4. 11受付)