

マイクロモデルに関する研究

岡安徹也 JICE 調査第一部 上席主任研究員

和田一範 国土交通省 関東地方整備局 甲府工事事務所 所長

米山 実 甲府工事事務所 調査第一課長

はじめに

マイクロモデル（極小水理模型）とは、水平縮尺数千分の1～1万分の1程度の非常に小さな縮尺の移動床水理模型である。そのサイズは1m×2m程度で、会議の際に机上に載せることができるほどのものである。

大縮尺模型による移動床模型実験については、1926～27年にライン川を対象に水平縮尺1/1,000、鉛直縮尺1/100、歪み度10の河床形状に対する実験が行われている。実験において、軽量河床材料を用い、試行を繰り返した中で「実験結果と実際の河床の形状が良く似ている」結果を得ることができたと記述されている¹⁾。国内では昭和55年に木下良作博士により「砂レキ堆相似」に着目した水理模型実験が示され、1/1,000程度の大縮尺歪み模型を用いて、砂礫堆の相似性に関する実験的研究がなされている¹⁾。

大縮尺模型は、一般的なフルード数の相似則等が成立するモデルではないが、河道の平面形状を縮尺したモデルに射流状態で通水することにより河道内形状について形態相似を再現させるモデルである。

大縮尺模型の再現性の検討においては、河床材料、勾配、流量、通水時間を変化させ現地河道の着目すべき事象に一致する条件を探る事が重要である。再現性の検討では、どのような現象が再現でき、何が再現できていないかを判断するために現地情報を的確に収集し、河道において生じている現象を十分に理解した上で再現性を検討する事が重要である。この現地河道に対する十分な再現性検討がマイクロモデルにおける必須条件である。

米国陸軍工兵隊では、河川の中で行われる事業の住民説明の際にはこの模型を用い、必要に応じて他の分野の研究者や住民側が提案する代替案もこの模型で実験をし、計画の修正をするなど、まさに事業合意形成のツールとしてマ

クロモデルを使っている。

本研究は、マイクロモデルを米国では事例のない急流河川に適用する場合の再現性について検討を行ったものであり、対象河川としては歴史的治水施設として現在評価が行われている、釜無川信玄堤付近の湾曲部を対象とした。

米国におけるマイクロモデルの概要

マイクロモデルは米国陸軍工兵隊の応用河川工学センター（AREC）で1994年に開発された極小水理実験模型システムであり、全体のコンセプトに対し米国特許が1997年に与えられている。ARECはミズーリ州セントルイス市のミシシッピー川の河岸に位置する研究所である。

マイクロモデルの代表的な縮尺は、水平が1：15,000から1：600、垂直が1：1,200から1：100であり、縦横歪みは5から13の範囲であり、木下良作博士が研究した砂礫堆相似則による模型規模よりも小さい模型となっており、縮尺は1m×2m程度の模型基盤に設置可能なように決められている。

河床材料は比重1.2程度のプラスチックが敷設されており、底部に設置された循環用ポンプにより河床材料についても循環されるシステムになっている。

また、小さな模型であるため通水後の河床形状を計測するためレーザーセンサーを用いた計測システムと一体で活用されている。

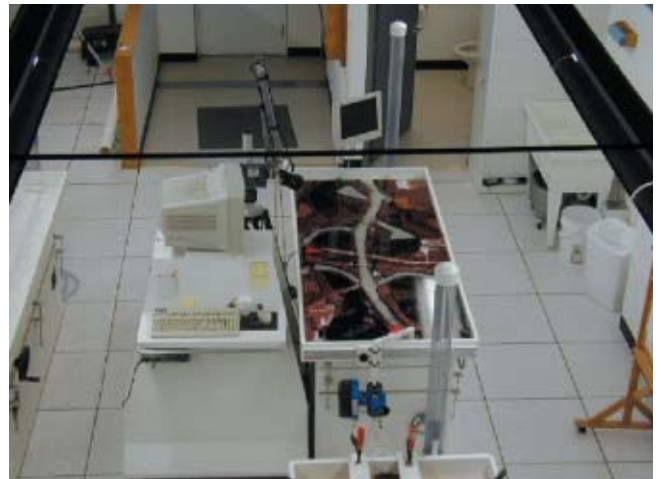
マイクロモデルは砂礫堆相似則による模型に較べてより縮小化されており、砂礫堆相似則で目安となった砂礫堆の領域を模型において同じ領域に設定するなどの模型規模、模型縮尺などの判断基準が無いモデルとなっている。

そのため、マイクロモデルはモデルの河床勾配、流量、河床材料などが容易に変更可能なように設置されており、実河道における河床形状を的確に再現する事ができるように事前に精度の高いキャリブレーションが必要となっている。従って、現況河道の再現に対しては実河道で生じている現象の要因を的確に把握しておくことが必要であり、要

因の把握度がマイクロモデルの再現性に大きく影響を及ぼす。このため現地調査、航空写真、河床平面縦横断の変化、地質図などの分析・検討を十分行う事が重要である。

マイクロモデルは、対象河道の平面地形を正確に縮小化した模型を用い、河床勾配、河床材料、流量、通水時間などを現地諸元、相似則にとらわれず現地河道に一致するような調整を行い、現地河道で生じている河床変動現象を適切に再現した極小模型とすることができる。

その意味では、模型の製作、条件設定には高度な河川技術者としての判断が求められる模型である。ARECにおいては、基本的な模型形状を製作した後キャリブレーションに約4ヶ月が必要であるとしている。



写真一 米陸軍工兵隊におけるマイクロモデル全景



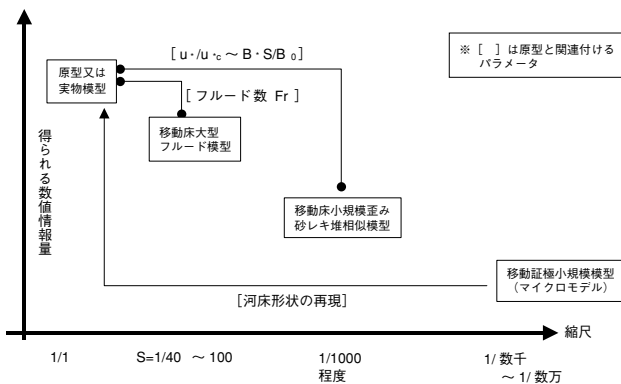
写真二 分合流モデル（河床材料の敷設深は10cm程度、河道法面は粘土などで微妙な形状を再現している）



写真三 河床形状計測用の3次元レーザーセンサー

マイクロモデル

河川形状について幾何学的に縮小した模型を用い、フルード則などの相似則にとらわれず、対象河川に生じている河床変動現象を再現させるように河床材料、河床勾配、流量、通水時間などを変更するモデル。個別の河川毎にその河川に応じたキャリブレーションを行うことでモデルの再現性を高めたモデル。



模型形式	フルード模型	砂礫堆積模型	マイクロモデル
模型規模	大規模	中規模	小規模
工期、経費	大	中	小
相似性	汎用的	現象の領域を対象	各モデル毎
表現能力	水位、流速、流況 河床変動	流況、河床変動	河床変動 (流況)

図一 マイクロモデルと他モデルとの関係

検討の概要

マイクロモデルにおいては一般的な水理模型実験で用いられている相似則が成立しないことから、モデルの再現性をキャリブレーションするため、実河川における洪水時の流況などの基礎データが必要である。

しかし、セグメント1の河川では洪水の出水が速く、マイクロモデルの再現性を確認する航空写真などの流況資料の入手は困難である。

そこで、洪水時の流況については、洪水前後に計測された河床断面資料に対し2次元河床変動計算を行い、洪水前後の河床形状を同定する事で洪水時の流況の検証資料を得ることとした。

マイクロモデルの検証資料

1 対象洪水

富士川における戦後の大洪水は、昭和34年と昭和57年の2回であり、昭和57年の洪水では御勅使川合流後の釜無川計画流量 $4,000\text{m}^3/\text{s}$ に迫る流量が観測されている。本検討においては比較的データの整備されている昭和57年8月洪水を代表洪水として選定した。

図-2は、御勅使川合流後の浅原橋観測所のテレメータ水位と流量観測データによるH-Q換算式より求めた昭和57年8月洪水の流量変化である。支川の御勅使川については流量に関するデータが無いため、便宜的に計画流量配分の比率で全体流量を割り振って、後の河床変動計算の流量条件とした。

2 検証資料

河床横断形状については洪水前後の横断測量資料を用い、水位については堤防治いの痕跡水位を最高水位の検証

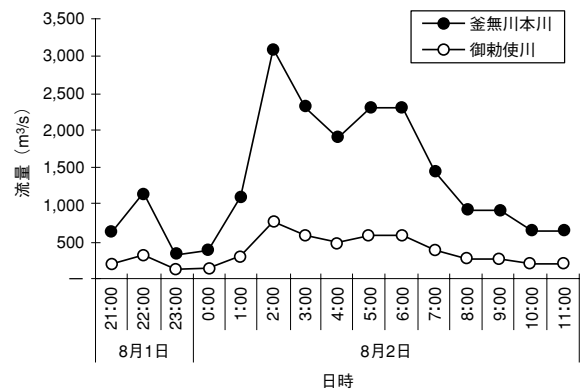


図-2 昭和57年8月出水の流量

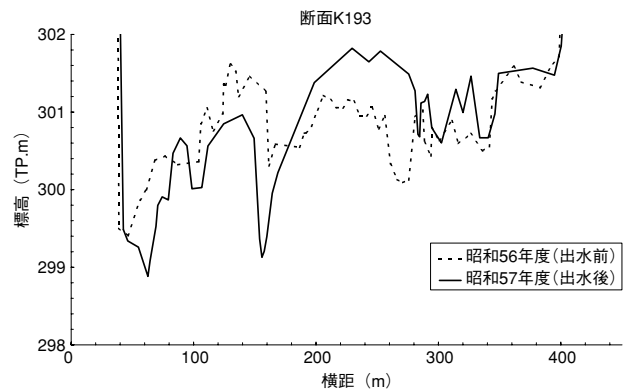


図-3 出水前後の河床横断形

資料として用いた。

数値計算モデル

1 解析モデルの概要

平面二次元の河床変動を得るために流れの計算は、流速の鉛直方向形状関数に余弦関数の積を用いるGalerkin有限要素法による準三次元解析を使用した。また、流量変化に伴い計算領域が変化するため、移動境界モデルを採用した。式(1)~(3)は、水深方向に積分された運動方程式と連続式である。

河床変動計算を行う際の流砂量式には、河道縦断方向にMeyer-Peter-Muller式を、横断方向には長谷川の式を用

いた。粒径は、一様粒径を想定し計算区間の代表粒径 $dr=40.8\text{mm}$ を条件として与えた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + R_0 L \cdot u - R_0 \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^z u \cdot dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^z v dz \right) \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{R_0}{F_r^2} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^z \rho g \cdot dz + DM' \cdot u + v \quad \text{式 (1)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + R_0 L \cdot v - R_0 \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^z u \cdot dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^z v dz \right) \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{R_0}{F_r^2} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^z \rho g \cdot dz + DM' \cdot v - u \quad \text{式 (2)}$$

$$\frac{1}{R_0} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^z u \cdot dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^z v \cdot dz = 0 \quad \text{式 (3)}$$

$$L' = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \quad \text{式 (4)}$$

$$DM' = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_h \frac{\partial}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_v \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad \text{式 (5)}$$

流砂量式

$$q_{bs} = 8.0 \sqrt{sgd^3} (\tau_* - \tau_{*c}) \quad \text{式 (6)}$$

$$q_{bmv} = q_{bs} \left(\frac{v_b - v'_b}{u_b} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial Z}{\partial n} \right) \quad \text{式 (7)}$$

ここで、 q_{bs} ：流下方向の流砂量、 q_{ns} ：横断方向の流砂量、 μ_s ：静止摩擦係数、 μ_k ：動摩擦係数、 τ^* ：無次元掃流力、 s ：河床材料の水中比重、 d ：河床材料の粒径、 v_b ：河床の横断方向流速、 v'_b ：螺旋流による河床の流速、 u_b ：河床における流速。

2 解析結果

図-12に計算によるピーク流量時の水面の流速ベクトルを示した。航空写真等による実洪水時の流速分布が得られないため比較検討することはできないが、御勅使川が合

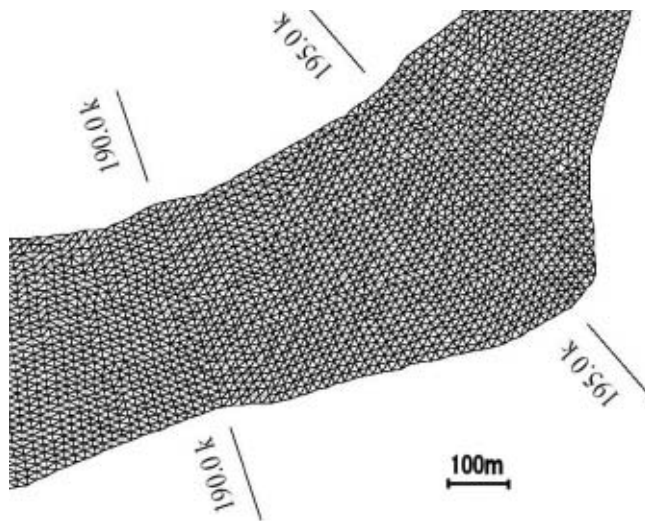


図-4 河道屈曲部の計算格子

流した後195km付近の高岩で主流が左岸に移動しその後直線的な河道を蛇行しながら流下している状況が計算されている。

図-5は、計算による最高水位と痕跡水位を比較したものである。痕跡水位のデータ量が少ないものの概ね最高水位が再現されている。また、図-6は出水前の河床高を基準に出水後の河床高の変動量を比較した図であり図中の塗りつぶし部は0.5m以上の河床低下部である。K200右岸周辺とK190左岸周辺で洗掘が生じていること、K190直下から河道中央に向かって洗掘域が生じていることなど、洪水後の河床変動状況とほぼ同様な現象を再現しており、二

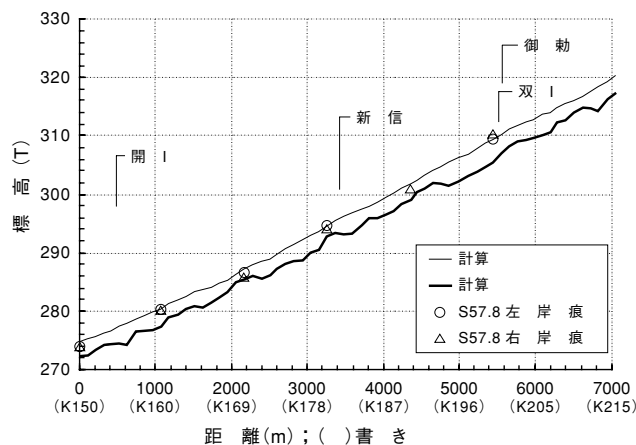


図-5 計算最高水位と痕跡水位の比較

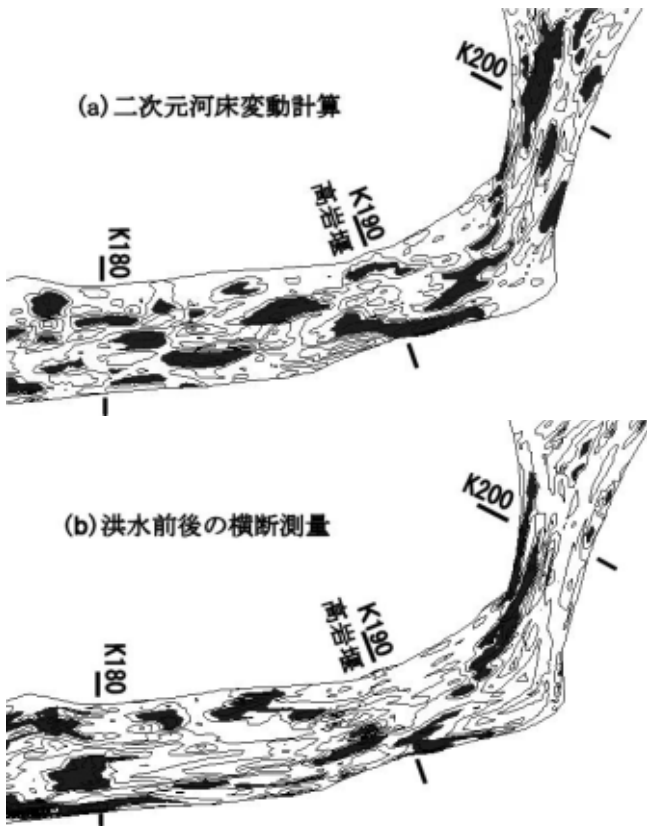


図-6 洪水後の河床形状

次元河床変動計算が出水時の河床変動を概ね再現できていると判断した。痕跡水位の検証、河床変動の検証から洪水時の流況についても概ね再現できているものと判断した。

河川マイクロモデルの縮尺と再現性の検討

1 マイクロモデルの製作

二次元河床変動計算と同様の区間である御勅使川合流点上流からその下流約6km間について河道マイクロモデルを製作した。マイクロモデルの縮尺は河道幅が模型レベルで10cm程度になるように決定した。検討対象域の川幅が約200~500mであることから、模型縮尺は $S=1/4,000$ とした。また、縮尺の違いによる河床形態や流況の再現性を検討するために縮尺を2倍の $1/2,000$ とした模型を製

作した。

図-7に示すようにマイクロモデルは河道の模型と水中ポンプ、水槽からなり、水を循環させる事の可能なシンプルな構造である。流量は小型電磁流量計とバルブ操作によって制御した。河道は耐水合板の上にアルミの直壁を立て

表-1 釜無川マイクロモデルの概要

釜無川モデル	
範囲	釜無本川 K150~215、L=6,000m 御勅使川 M0~M17、L=500m
給水	釜無川本川、御勅使川
水位調節	開国橋下流 (K150)
治水施設	連続堤防
構造物	四ヶ材堰 (K200)、高岩堰 (K190) 第三集水堰 (180) 上堰頭首工 及び右岸の堰 (K175)
縮尺	水平縮尺 $1/4,000$ 、 $1/2,000$
模型規模	1.8m×0.6m、3.6m×1.2m

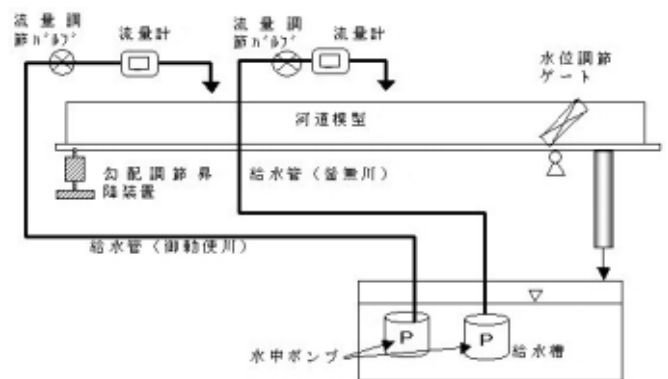


図-7 マイクロモデルの概要

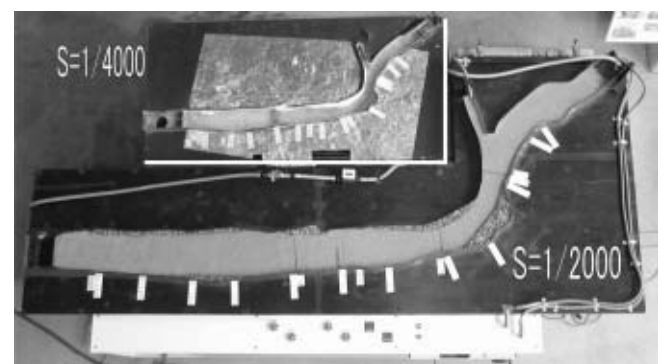


図-8 釜無川マイクロモデル

て河道平面形を再現した。河道内には現地河床材料の粒度分布形状を模した軽量河床材料（石川ライト、比重1.6）を敷き均した。

河床材料については粒径分布を変化させ、再現性について感度分析を行い、粒径分布を設定した。

2 計測手法

マイクロモデルにおける流速や河床形状の計測は、計測対象が小型であることから流速計を水中に挿入しての計測やメジャーを用いての河床高の計測が困難である。そこで、流速・流向の計測にはデジタルビデオの解析によるPIVを使用し、通水後の微細な河床高の計測にはレーザー形状計測装置を使用した。

レーザー形状計測装置は、河床の垂直変位を測定するセンサーヘッド（Keyence社製LB300）をステッピングモーター駆動のX・Yトラバース装置に取り付け、計測位置や範囲をパソコンで制御し、微細な河道形状（0.1mmの比高）を計測可能なシステムである。

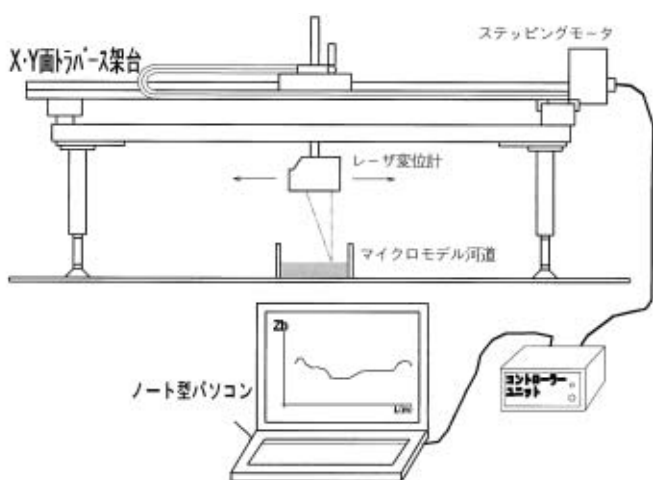


図-9 レーザー形状計測装置の構成

3 実験条件

縮尺1/4,000マイクロモデルについて、河床材料の粒径、模型勾配、釜無川本川と支川御勅使川の合流比率の組

み合わせによる約30ケースの通水によって感度分析を行った。本論では、1/4,000マイクロモデルにおいて流況及び河床形状の再現性が比較的良いと判断した実験ケースについて記述し、1/2,000マイクロモデルとの比較検討を示す。

模型流量は、マイクロモデルを水平と鉛直の縮尺歪みが5倍のフルード模型と仮定し、フルード則に基づき昭和

表-2 実験条件比較表

Case No.	模型縮尺	模型流量 ℓ/分	模型勾配
1	1/4,000	2.65	1/135
2	1/2,000	14.33	1/135

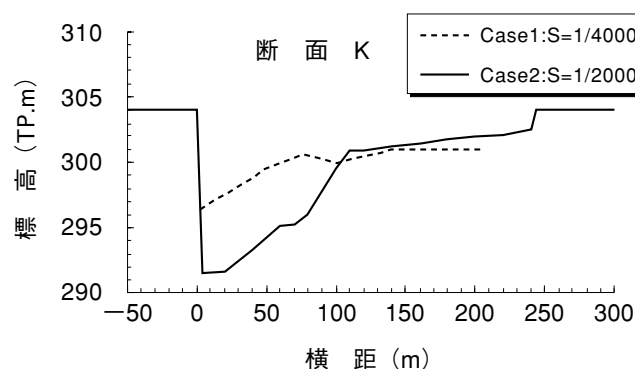
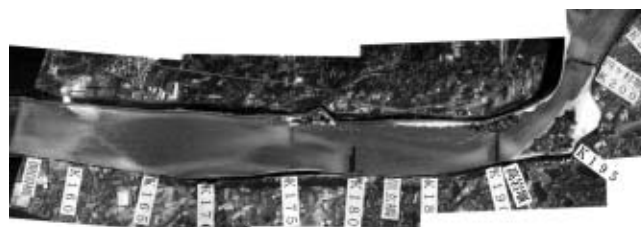
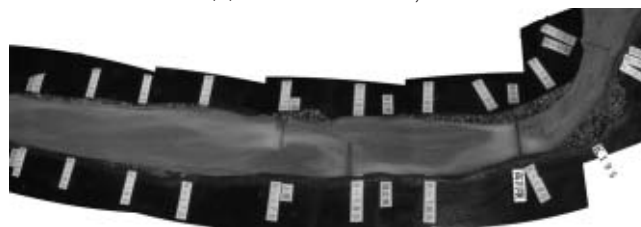


図-10 通水後の河床高



(a) Case1 : S = 1 / 4,000



(b) Case2 : S = 1 / 2,000

図-11 通水後の河床形状

57年8月洪水の最大流量から算定した。模型の河床材料には、二つのマイクロモデルとも同じ材料を使用し、現地粒度分布形を軽量河床材料（石川ライト）の混合砂とした。

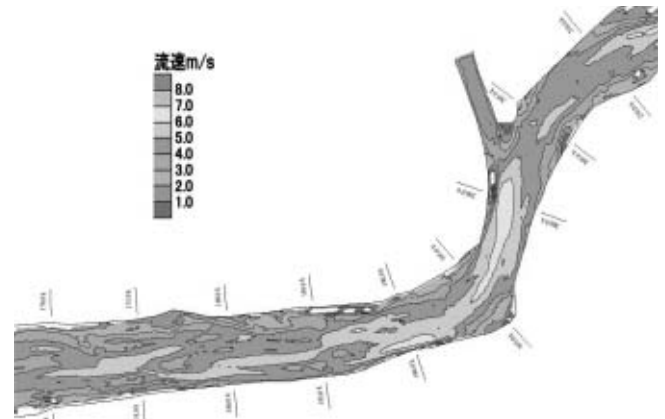
4 実験結果

図-11は、通水後に少流量を流し、滞筋を解りやすくした写真であり、滞筋位置の特徴は次のとおりである。

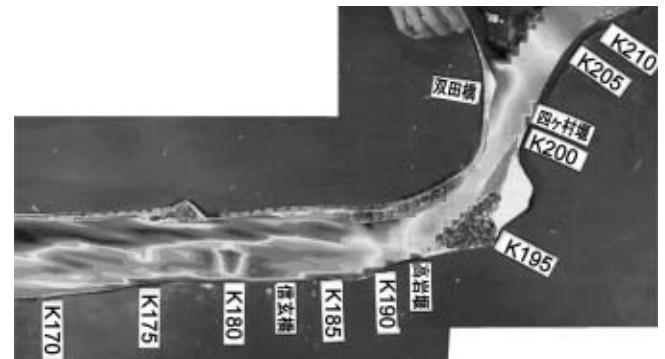
右支川の御勅使川が合流した後、滞は左岸にそって流下しK195から高岩堰（K190）間で深掘れが生じる。そのまま左岸沿いを流下し上堰（K175）付近で滞は右岸に移動する。この間の右岸側は堆積域となる。このような滞筋位置の特徴は、縮尺が違っていても同じ傾向を示している。

また、1/2,000マイクロモデルの方が1/4,000のそれよりも河床形状の表現力（砂州形状や微地形）が増したようにも思われるが著しいものではなく、反対に縮尺を2倍の大きさにしても、現河道では生じていない高岩堰の上流に生じている深掘れ（横断工作物設置の影響が過大に出してしまうマイクロモデル特有の現象）を解消する事はできなかった。

河床の縦断・横断形状については、鉛直縮尺を適切に与える事により縮尺の影響は殆ど無くなることが確認された。



(a) 二次元河床変動計算



(b) 1/4,000マイクロモデルの流況

図-12 水面の流速分布

なりそのまま左岸沿いに流下し、K175付近から徐々に主流が河心に移動する。このような全体的な流況は、マイクロモデルも同様である。

しかし堰のあるK180やK190地点では堰からの段落ち後の流速低減域がマイクロモデルの方が強調されている。これは、マイクロモデルの場合、水深が5~10mm程度と非常に薄い状態で流れているため、堰付近での過大な洗掘により流下断面積が著しく増大することによる流速低下が著しく生じていると考えられる。河道内に横断工作物がある場合は、軽量河床材料を用いている事と大縮尺により、鉛直方向への過大な洗掘が生じている事に対し、河床材料の選定や、マイクロモデルでの横断工作物の設置方法や実験手法など今後の研究が必要である。

しかし、河道の平面形状の寄与が大きいと思われる主流

マイクロモデルの検証

1 平面流況の再現性

図-12は、二次元河床変動計算におけるピーク流量時の水面流速分布とPIVによって計測されたマイクロモデルの水面流速分布である。マイクロモデルがフルードの相似則を満足していないため流速の絶対値については検証できないので、主流の位置、流速分布に着目してその再現性を確認した。

二次元河床変動計算の流況の特徴は、右支川の御勅使川が合流した後、K190地点の高岩堰付近の左岸が水衝りと

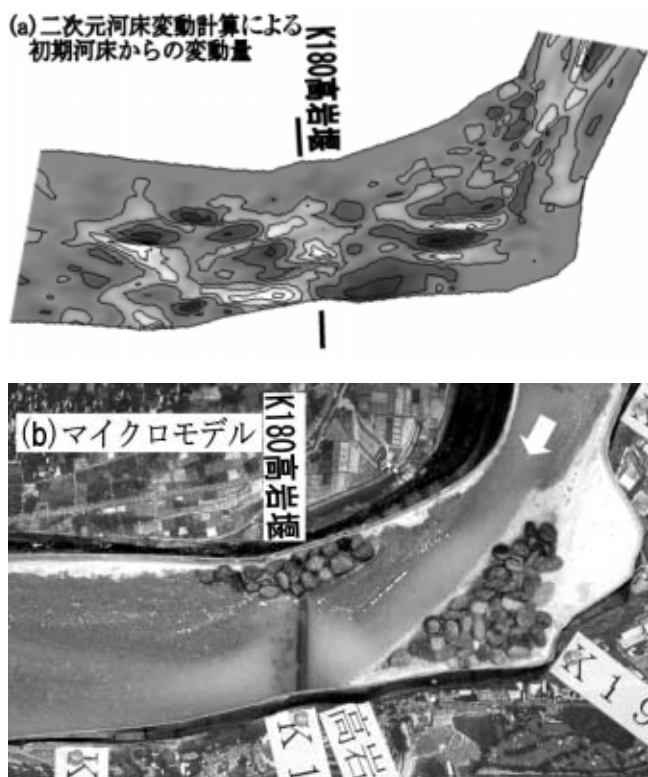


図-13 河道屈曲部の河床変動

の流下位置についてはマイクロモデルによって概ね再現できることを確認できた。

2 河床形態の再現性

マイクロモデルによる実験は最大流量相当を定常的に通水しているため、ピーク流量時の二次元河床変動計算による河床高の変化量を河道湾曲部において比較した。図-13に示すように河道湾曲部の深掘れ状態に特徴があり、マイクロモデルにおいてK180周辺で深掘れ位置が左岸に偏っている状況は、先に検証された二次元河床変動計算と同様である。しかし、洗掘深さについては、流量を決定した縮尺の歪み率で原型値に割り戻すと過大に評価されているため、河床変動の縮尺のとらえ方については今後検討を要するものと考えている。

結論

実測資料の得にくい急流河川において河床変動計算を検証材料としマイクロモデルの適用性を検討した。未だ研究初期の状態ではあるが、以下のような事が解ってきた。

- ①マイクロモデルを用いて河床勾配1/300の砂利河川、釜無川を対象に洪水流の再現検討を行ったが、河道の平面形状による影響を強く受ける主流部の流れについては概ね再現できていると判断された。
- ②マイクロモデルでは一般的な相似則が成立しないため流速分布の再現性について個々の対象について詳細な検討を行う事が必要である。この場合、模型に用いる河床材料の選定や横断工作物の設置方法が大きく再現性に影響を及ぼす事が分かった。
- ③河道全体流況の再現性のために用いる軽量河床材料は、河道内の横断工作物周辺では顕著な局所洗掘を生じさせるため、河道内工作物を含むモデルでは顕著な局所洗掘に対する模型上の工夫などが必要である。

おわりに

本研究は研究の堵についたばかりで、研究報告とするにはまだまだ内容が不十分な点多々あったことと思う。

今後、モデル河川を用いて更なる研究・開発を実施し、我が国においてマイクロモデルを適用するに際しての、マイクロモデルのサイズや使用する河床材料、勾配、流量、流速分布や河床材料等の水理データの解析、モデルのキャリブレーションにあたっての留意点等、今後の活用にあたっての指針について、再度報告を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 木下良作：大井川牛尾狭窄部開削の影響に関する「砂レキ堆相似」による模型実験、昭和55年、8月、静岡河川工事事務所
- 2) 宇塚公一、和田一範：住民合意形成の新しいツール「マイクロモデル」について、ダム技術NO.157
- 3) 和田一範等：「極小移動床水理模型の国内での活用について」河川技術論文集、第7巻、2001年6月