

◆ 報 文 ◆

極小移動床模型「マイクロモデル」による信玄堤の治水機能の
考察合意形成ツールとしての国内での活用に向けて

和田一範*

1. はじめに

1998年11月、建設省・(財)国土開発技術研究センター(いずれも旧称)主催により日米河川技術セミナーが開催され、この中で米国陸軍工兵隊セントルイス地区事務所の河川課長クロード・N・ストラウザー氏からマイクロモデルと呼ばれる極小移動床水理模型の紹介がなされた¹⁾。その後、筆者らは1999年1月に日米科学技術交流の目的で米国陸軍工兵隊を訪問した際、セントルイスにある工兵隊の応用河川工学センター(Applied River Engineering Center 略称 AREC)にてマイクロモデルの実物を見学し、その使用方法などについて説明を受けた。工兵隊ではミシシッピ川で実施される河川事業の住民説明の際に、テーブルサイズのこの模型を用い、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についても、この模型を用いて説明会等の場で実験をし、場合によって計画の修正をするなど、まさに合意形成のツールとしてこの模型を使っていることが判明した。この説明を受けて筆者らは、わが国においても河川事業の実施にあたっての、住民との合意形成を図る上での有力なツールとして、このマイクロモデルの活用が図れる可能性を感じ、国内河川での活用に向けて検討を進めてきた。

以下にマイクロモデルの概要について説明し、釜無川と御勅使川合流点に展開された歴史的治水施設群、信玄堤の機能評価とその説明に、マイクロモデルを用いて検討を行った事例について報告する。

2. マイクロモデルの概要

(1) マイクロモデルの概念

マイクロモデルは、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。



写真-1 マイクロモデルの全景

河道内の流水と土砂移動を卓上の水路中でシミュレートできるように製作されており、流水、河床材料は模型内で循環するシステムとなっている。流量は、パソコンによる制御で変動をさせ、洪水の波形を擬似的に再現することができる。

河床材料には、比重の小さいプラスチックの細片が用いられており、河床材の供給についても、模型の下流端に流出した河床材料が再度、上流から供給され、平衡状態が保たれる循環式となっている。マイクロモデルは極小模型で現地を再現することから、水平縮尺に対し鉛直縮尺は数百分の1～数千分の1のように大きな歪みを持って設定されている。

工兵隊はこのような循環式機能などを総合的に含んだシステム全体としてのマイクロモデルについて、米国での特許権の取得をしている。

(2) 小縮尺模型について

小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1/1000、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²⁾。国内では昭和55年、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、1/1000程度の小縮尺

Consideration on Flood Control Function of Shingen Embankment with Micro Movable Bed Model "Micro model"
— Toward Japan's use of Micro Models as Consensus-making Tools —

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²⁾。小縮尺模型は一般的なフルード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砂州の移動状態を考慮した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。

しかし、今まで検討されてきた小縮尺模型は1/1000程度のものであり、本対象モデルのように数千分の1～1万分の1のような極小縮尺のものではない。このように極小縮尺を用いるマイクロモデルでは鉛直縮尺の決め方や通水流量の設定方法については、その手法が確立しているわけではなく、通水によって生じる河道内に生じた結果から現地河道への適合性を判断することとなる。

小縮尺模型の再現性の検討においては、水平模型に対し、河床材料、勾配、流量、通水時間を変化させ現地河道の状況に一致する条件を探ることが重要である。このため十分な河川情報に基づいて河道特性を把握することが求められ、その再現性が確認できる河川において、はじめて構造物などの設置による影響などについて検討することが可能となるものである。

(3) マイクロモデルの装置

マイクロモデルは写真-1に示すように対象区間を幅1m、長さ2m程度の範囲で製作される。河道部については河床材料の洗掘を考慮して10cm程度の深さで作成し、軽量河床材料を敷設する。河床模型には勾配を任意に変化させられるようにジャッキが設置されている。流量可変ポンプにより給水され、底部に設置した水槽を通して循環している。河床材料にはプラスチック細片が用いられており、その比重は1.2程度、粒径は0.2～0.6mm程度である。

3. 釜無川・御勅使川歴史的治水施設群の検討への適用

(1) 検討の概要

釜無川と支川御勅使川には信玄堤に代表される、歴史的治水施設群と呼ばれる一連の治水施設が残存している。このような施設については古文書の類をはじめ既往文献などにより歴史的な経緯などが示されているが、設置された順序、理由、根拠などについては明確な資料が無く、様々な考察がなされている。そこで、各施設の機能についての歴史的な検証にあたって、対象区域をマイクロモデルを用いて再現し、各施設の河道の安定化に及ぼす影響について検討を行い、各施設の持つ機能

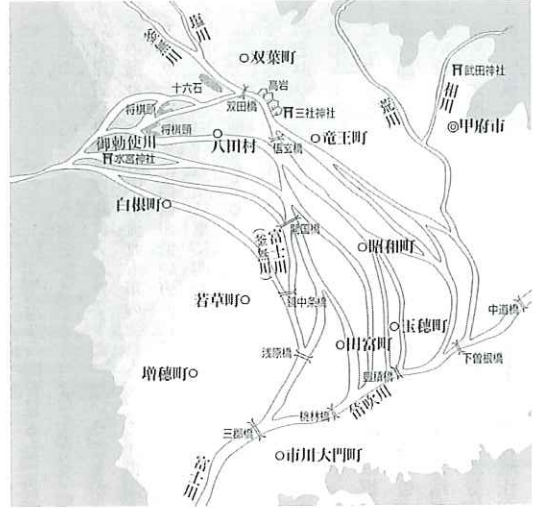


図-1 検討対象地域と釜無川、御勅使川の昔の流れ⁶⁾

について検証を行った。

図-1に検討対象地域と釜無川・御勅使川の昔の流れを示す。二つの流れともに現在よりも大きく東に振れ、甲府盆地中央に流れ込んでいる様子がわかる。

(2) 歴史的治水施設群の概要

信玄堤をはじめとする歴史的治水施設は、御勅使川の流れと釜無川本川の流れを制御するための総合的な流水制御施設群と考えることができる。信玄堤の特徴は、単なる堤防の整備だけではないところにある。それまで、扇状地を自由に流れていた御勅使川の流れを二つに分けて、その主流を竜王の高岩にぶつけ水勢を削ぐ方法をとったものである。竜王の高岩は、釜無川左岸の赤坂台地の西端にあり、現在の国道20号竜王バイパスのところで竜王町と双葉町の境に位置する丘の、釜無川の河岸崖である。御勅使川の前御勅使川の旧流路のひとつである前御勅使川の流下ルートでは、まっすぐに釜無川の堤防を突き破ってしまう洪水流を、途中で流路を変え、水勢を削ぐ施設を設けることにより、高岩という天然の水制にぶつけて制御してしまおうというのが、信玄堤の流水コントロールプランである。各施設の想定される機能を図-2で説明する。

- ①山間から流れ出した御勅使川の流路を、扇状地の出口に「石積み出し(A)」を並べて安定させ、北側に向ける。
- ②「白根将棋頭(B)」で流路を二分してエネルギーを減じ、御勅使川本流と前御勅使川の二つの流れに分ける。

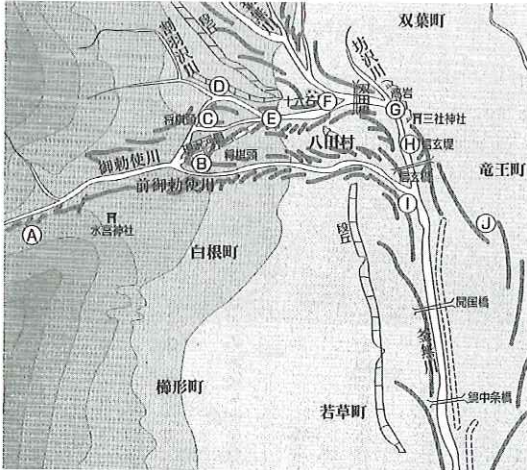


図-2 信玄堤と歴史的治水施設群

- ③北側の流れ御勅使川本流を、さらに下流の「竜岡将棋頭(C)」で再び分流し、支川の割羽沢川を合流させる(D)。
- ④竜岡台地の溶岩岩盤を掘り下げて「堀切(E)」という流路を作り、流れをここに誘導する。
- ⑤釜無川との合流点に十六個の巨石「十六石(F)」を並べ、水流を高岩へ向ける。
- ⑥御勅使川と釜無川の合流した水を高岩(G)へとぶつけ、水勢を弱める。
- ⑦高岩の断崖延長線上に、信玄堤(H)と「付け出し」堤を設け、さらに流水のエネルギーを減ずる。
- ⑧高岩から跳ね返ってくる釜無川の水勢を、下流で合流する前御勅使川の水勢とぶつけ相殺する(I)。
- ⑨信玄堤より下流の釜無川堤防は、霞堤(J)構造として、洪水の流量が増したときに、一時的に氾濫させ、甲府盆地への壊滅的な洪水氾濫を防止する。

(3) 歴史的治水施設のマイクロモデルによる再現製作したマイクロモデル(以下、釜無川・御勅使川モデル)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 $S=1/4000$ とした。対象区間は信玄堤を含む6km区間を対象とし、模型延長を1.2mとした。釜無川・御勅使川モデルは模型内部に水中ポンプ、水槽を有し単独で水を循環させることが可能なシンプルな構造とし、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によ

表-1 釜無川・御勅使川モデル

範 囲	釜無本川	鏡中条橋~舟山橋 (10.5km)
	御勅使川	釜無川合流点から8.5km
給 水	釜無川本川、御勅使川、割羽沢川	
縮 尺	水平縮尺 1/4000	
模型規模	3.0m × 2.5m	

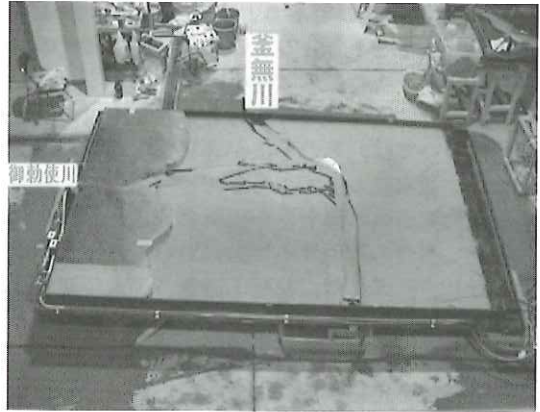


写真-2 釜無川・御勅使川モデル

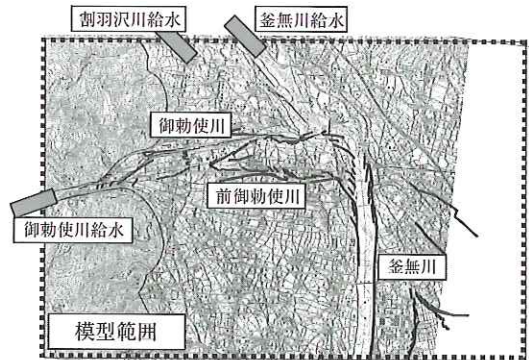


図-3 釜無川・御勂使川モデルの範囲

り粒径分布を設定した。

写真-2の写真中の白い部分が竜王の高岩に相当する場所であり、河岸崖や堤防については、アルミ製の板を現地の線形に合わせて加工して設置した。扇状地に出た流れを制御する将棋頭等は、写真中の黒い部分でありプラスチック製の板によって再現した。

(4) 通水の条件

1) 河床材料

河床材料は、土砂の流動性、洗掘・堆砂形状の再現性の予備実験から算定した。材料は主として入手しやすさ等から、大型模型実験の軽量河床材料としても使用されている石川ライト(比重1.6

程度、軽石)を用いた。粒度分布形を現地に合わせることにし、平均粒径は0.8mmとした。

2) 通水流量

流量は、扇状地模型の水平縮尺が1/4000であり、鉛直縮尺については5倍の歪模型と仮定して1/800とし、フルード相似則により歪み縮尺による流量縮尺を用いて算定した。

$$\text{流量縮尺} : 1 / (4000 \times 800^{1.5}) = 1 / 9.05 \times 10^7$$

御勅使川の計画高水流量 $700\text{m}^3/\text{s}$ を上記縮尺で模型値にすると、

$700 \times 1 / 9.05 \times 10^7 \text{m}^3/\text{s} = 0.0077\% / \text{秒} = 0.46\% / \text{分}$ となる。しかし、この流量で通水したところ、扇状地上流付近で流路が浸透によって消失する部分が発生したため、試行した結果 $2.2\% / \text{秒}$ を通水流量として採用した。

3) 供給土砂量

給砂は1分ごとに一定量の砂を上流部に投入して行った。給砂量は経験的に、基準供給土砂量毎分10ccと定めたが、これは無施設の状態において、以下の条件を満たすように決定したものである。

- ・扇状地上流部に過大な堆積が生じないこと
- ・扇状地下流端まで土砂の一部が流送されること
- ・扇形の扇状地が敷き均した砂の上に形成され、流路が常に扇状地全体を移動すること

(5) 釜無川・御勅使川モデルの検証

マイクロモデルを用いる場合、相似則が成立しないことから製作した個々のモデルに対して、実河川の現象の再現性を検証することが必要である。しかし、本モデルの場合、扇状地内の氾濫域については、実河川でのデータが無く検証を行うことができないため、現在の釜無川本川を対象としたモデルについて河床形状を計測することでモデルの検証を行った。実験にあたっては、釜無川部分のみの、1/4000抽出模型を製作し、釜無川、御勅使川に通水を行った。

図-4に、2)通水流量に示す流量縮尺を用いて、釜無川既往最大流量 $3820\text{m}^3/\text{s}$ を通水した後のマイクロモデルの河床形状を示す。また、図-5に平成9年度の対象区間の航空写真を示す。

マイクロモデルへの通水後のミオ筋を比較すると微細な流路網についての再現は困難ではあるが、湾曲部での主流による洗掘、湾曲下流部の直線河道部における主流、複列の流路形状は概ね再現ができておりと判断される。洗掘深、砂州高などの評価は困難ではあるが、河床の移動に対する河床形態について再現ができており、このモ

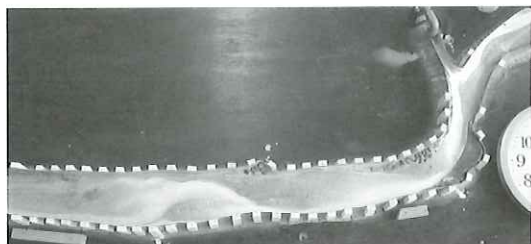


図-4 マイクロモデル通水結果



図-5 平成9年度地形写真

デルによる扇状地地形の検証は可能であると考えられる。

(6) 釜無川・御勅使川モデルを用いた検討

扇状地河道の形成などの現象は、洪水発生など確率論的な要素があるため、実験では同一条件で5回通水を行い、安定的に発生する現象について、定性的な把握を行った。この実験によって、信玄堤をはじめとする歴史的治水施設群について、下記のような事項が確認された。

1) 石積出しと将棋頭

石積出しは扇状地内での流路安定に大きく寄与しており、石積出しがない状態では流路は大きく変動した。

白根将棋頭は石積出しにより北側に向けられた御勅使川本流を大きく二つの流れに分けてエネルギーを減じる機能を有していたと考えられている。通水を行った結果土砂量が基準供給土砂量の2倍までは、流路が安定していたが、土砂量が基準供給土砂量の3倍になると流路が不安定になり、1倍の土砂量に戻しても初期の流路に戻ることが少ない。御勅使川においては急激な土砂流出が生じていたことを考慮すると、白根将棋頭は一定規模の流量までは機能するが、大規模出水に対しては流路変遷が生じ、機能維持のための管理が必要であったのではないかと考えられる。

2) 2つの将棋頭

御勅使川の流路は白根将棋頭によって2つに分流、減勢され、北側の流れは下流の竜岡将棋頭で再び分流されて、洪水流を減勢させる働きを持つ

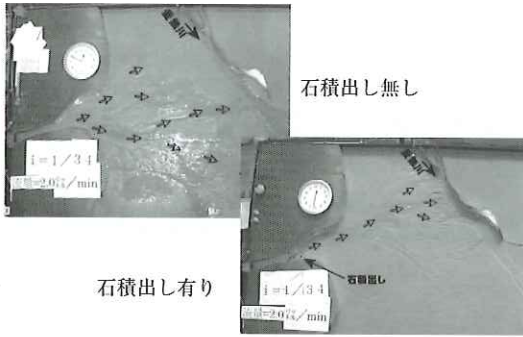


図-6 石積出しによる流路の安定



図-7 白根将棋頭による分流

ていたと考えられている^{5) 6)}。しかし実験では、白根将棋頭によって流れが分かれている状態と、流れが北側に偏流し竜岡将棋頭方向に流れて分流する状態の2つの現象は確認されたが、白根将棋頭で分水された流れが再び竜岡将棋頭で分水されることはなかった。

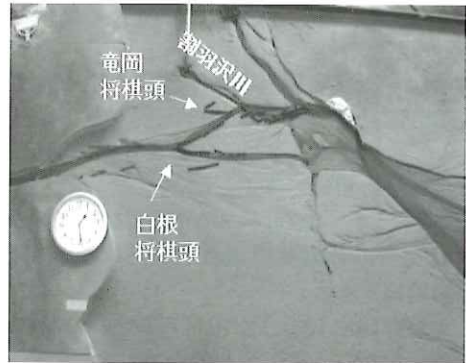
白根将棋頭で流れが分かれている状態では、流路は非常に安定している。割羽沢川の合流はそれより北側への流路の形成を抑制する効果がある。

流れが北側に偏流し、竜岡将棋頭で直接流れが二つに分かれるようになって、割羽沢川の合流によって、流路は堀切へと向かうように機能している。すなわち割羽沢川の合流は北へ流れようとする流路を、堀切に誘導する役割を果たしていると考えられる。

従来より、2つの将棋頭は1組として機能していたのではないかと考えられているが、実験による機能評価では2つの将棋頭が1組で機能していたのではなく、流量規模、流出土砂の規模に応じて流路変遷が生じ、各々の将棋頭が独立で機能していたのではないかと判断される。

また、2つの将棋頭により流路が安定することで堀切まで流路が繋がることとなり、土砂量の増加に対しても流路を安定なものに保つことができたと考えられる。

白根将棋頭に流れが向かうケース



白根将棋頭より北側に流れが向かうケース

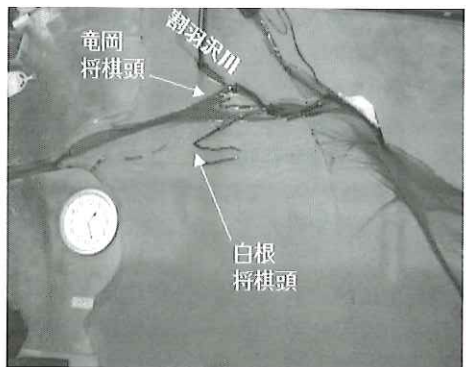


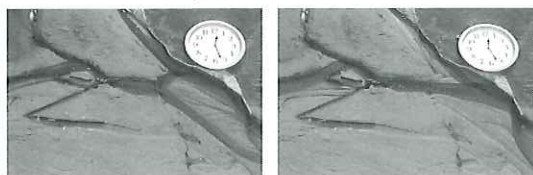
図-8 2つの将棋頭による流れ

3) 堀切、十六石

十六石には、御勅使川と釜無川の合流した水を高岩にぶつけ、水勢を弱める機能があったと推察されている。堀切については、割羽沢川と御勅使川の流れを一本に集めて十六石に向かわせる機能があったと考えられている。

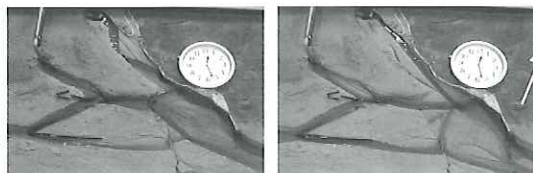
実験は、流路が白根将棋頭よりも北側に流れ、直接竜岡将棋頭で二分される場合と、白根将棋頭で二分されて流下する場合について、それぞれ、堀切がある場合と無い場合の検討を行った。

堀切が設置されていなくても御勅使川の流れは、霞提、割羽沢川などにより、堀切付近へ流路が安定することが確認された。しかし、堀切がない場合、釜無川本川の河道を流下する流れが不安定となって、高岩へ向かう流れとはならない。これらのことから堀切の機能としては、御勅使川の流路を安定させることのほか、御勅使川と釜無川の合流した流れを、高岩へと安定して向かわせるために機能していたことがわかった。



堀切無し 堀切有り

図-9 流れが北側に偏った場合



堀切無し 堀切有り

図-10 根将棋頭で分水された場合

4. 河川教育用ツールとしての活用

釜無川、御勅使川を対象にマイクロモデルを用いて扇状地河川の河道状況、歴史的治水施設群の考察などについて検討を行った。河床形状の相似を考慮して河床勾配は射流状態での通水とし、通水流量はトライアルにより修正を行い、実験の条件は大きく歪んでいる。このモデルでは、現地状況の再現のための条件の設定は、個々の模型について行う必要がある等の課題があるが、概ね扇状地での蛇行河道の現象について再現することが可能であることがわかった。

信玄堤をはじめとする歴史的治水施設群のような施設考証にあたっては、正確な資料が少ないことから検討条件などは想定によることとなる。また、水理的な相似性を考慮した従来の大規模模型では、施設規模が大きく、様々なストーリーに対する検討を行うことが時間的にも、経費的にも困難であることが多い。そこで、このようなテーマについてはマイクロモデルを検討のツールとして用いることで現象の擬似再現を行い、検討を深めることが有効であると考ええる。

また本モデルの実験結果は、信玄堤の原理を説明するテレビ番組（平成15年8月YBS山梨放送放映）で活用され、今後、河川教育用ツールとしての活用にも大きな展望が開けた。

5. おわりに

地域の人々の意見を的確に反映した個性ある河川づくりを実現させていくためには、計画の立案から決定に至る過程において地域住民、関係市町

村、学識経験者等の意見を幅広く聴取していく必要がある。そしてこの際に重要な位置付けを持つものが情報の公開と情報の共有である。堰の改築など一定の目的の河川事業について、様々な見解の人々が、それぞれ一方的な情報のもとで、議論のすれ違いを生じている例がある。様々な立場の方々が同じ情報を共有して、同じ視点に立った上で、その河川の将来を真剣に議論していくことが重要である。このための検討のツールとして、現象の擬似再現が安価で短時間に実施できる、わかりやすいシステムが必要である。

マイクロモデルは河川の計画策定にあたって、様々な立場の人々が同じ視点で現象を捉え、判断をする、合意形成の新しいツールとして、また河川教育用のツールとして、我が国でも大きな適用の可能性を持つものと考ええる。

参考文献

- 1) 日米河川技術セミナー報告書：建設省・(財)国土開発技術研究センター：1999年1月
- 2) 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，静岡河川工事事務所，1980年8月
- 3) 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.157，1999年
- 4) 和田一範、岡安徹也、浜口憲一郎、市山 誠：極小移動床模型の国内での活用について、河川技術に関するシンポジウム，2001年6月
- 5) 武田氏研究会：武田氏研究第二号治水特集号：1988年
- 6) 和田一範：信玄堤 千二百年の系譜と大陸からの潮流，山梨日日新聞社，2002年12月

和田一範*



国土交通省国土技術政策総合研究所流域管理研究官
(前甲府工事事務所長)
Kazunori WADA