

河川水理模型実験の最近の進歩

須 賀 堯 三

1. はじめに

本論における取扱い範囲を、河川関係の水理的な模型実験に限定し、河川水理模型実験のことを、ここでは簡単のため、“模型実験”と呼称することにする。

模型実験は、河川計画において複雑な現実の改修問題に対処する場合に、古くより重視され、数多く実施されてきた。とくに、三次元的な問題を考察するうえに大変効果的な手段と認められ、模型実験に対する要請件数は着実な伸びを示してきている。

いっぽう、最近ではModellingに関する研究が盛んに行なわれている。とくに、高速計算機を駆使しての数値計算によるSimulationがもてはやされている。理論的には、相当複雑な三次元現象であっても、このような数値解析法によって解をうることは可能であろう。この場、数値モデルの精度、解析に要する時間的要素、およびその経済性などについては問題とされなければならないであろう。しかし、そのような懸案事項が解決され、複雑な三次元現象に関する計算法が確立されたとしても、いっぽうの水理的な模型実験の地位が根底から低下するとは考えられない。模型実験によれば、模型の中での水の流れを実際に目で確かめ、複雑な三次元的な現象への理解を深めることができるからである。最近では、“かせんや”の数が減少してきているといわれる。このような時代になれば一層のこと、水や土砂の運動への理解を容易にする模型実験の実要性が再確認される。ちなみに最近の動向として、模型実験は国際水理学会のバンコク・シンポジウム(1973)、および土木学会の水理講演会(1974)などにおいて、その主要テーマの一つに採りあげられ、活発な討議が行なわれた。

この水工シリーズにおいて本題が採択された理由の一つに、以上のような背景が存在するものと思われる。模型実験技術には世間を騒わがせるような著しい進展はみられないが、着実な発展の途をあゆんでいることに疑いはない。固定床実験から移動床実験が定着し、定性的なものから定量的なものへと脱皮し始めている。遊水池や河口部の模型実験のように、以前は避けていた新しい分野のものにまで守備範囲の拡張が行なわれている。これらは基礎的研究成果の進展や実際面からの要請が、実験技術の発展に寄与していることに基づくものであるが、その根底に大きく横たわる、これまで培われてきた基礎的な潜勢力の存在をあらためて認識せざるを得ない。

模型実験を実施する場合に、特に強調されなければならないことがある。それは模型範囲だけの現象の理解と認識だけでは不十分であって、その川全体を一つの生きたシステムとして把握、その中での位置づけが不可欠ということである。このことは、逆に模型実験が河川のシステムを考察する場合に重要な役割を演ずることにもなりうるであろう。このような意味あいにおいて、ここでは、ひろく一般の河川技術者を対象に、模型実験法の一般特性について概説すると同時に、模型実験の発展の歴史をたどりながら、各種の問題点について考察してみたいと思う。なお、第二章の模型実験の概要と特質、第三章の模型実験の相似律、および第四章の模型実験計画の記述は、後の章への若干の関連と、誘導のための一般記述であることをおことわりしておく。

2. 模型実験の概要と特質

実際の問題に関連して、対象とする現象を研究する方法としては、現地資料の解析、解析的方法、数値計算、アナログ量による実験、および水理模型実験などがある。これらの研究方法の相互関係は完全に異

質のものではなく、相互に多少のオーバーラップがあり、それぞれの研究方法の、全体の系の中における位置づけが必要である。一般に広く認識されているように、水理模型実験の意義するところは、とくに三次元的な局所現象の解明であり、水理模型実験を行えば、他の方法による研究を必要としないということではない。

水理模型実験の目的は、関係する基礎方程式を模型を用いて解くことであり、近似解であることに変わりはない。その結果、実物において起った、あるいは起るべき現象を必要な精度で詳細に知り、あるいは予知することである。この場合、その対象とするところは、河川、水文、発電水力、砂防、かんがい、海岸、港湾、海洋、船舶、流体機械、航空、気象、土質、上下水道など、およびその他の分野の流体に関する現象を全て包含する。これらを一括して議論することも可能であるが、本論においては、河川水理模型実験の範囲を、河道および河川構造物の水理機能に関するものに限定する。

模型実験の種類としては各種のものがあ、目的等に応じて使いわけが行なわれている。それらは、(1)固定床実験と移動床実験、(2)定流実験と不定流実験、(3)歪模型と歪のない模型による実験、(4)二次元実験と三次元実験、(5)縮小模型、実物模型（現地試験—通常実測および航測など）と拡大模型による実験、(6)水流、混層流（浮遊流、密度流および空気混入流など）、空気流と油流などによる実験、などである。

つぎに、模型実験が他の研究方法に比して非較的得意とする現象は二次元流と三次元流であり、具体的な水理現象としては、局部的な流況（流量、流速分布、水位、エネルギー損失、渦と剥離現象、および流線と水あたり）および局部的な土砂流送特性に基づく洗掘と堆積の現象である。過去の模型実験実施例から判断して、河川計画上模型実験から有力な設計指針の得られる具体例としては次のようなものが挙げられよう。^[1]すなわち、護岸と水利、導流堤、橋脚、床固、水門、せき、河口堰、大型仮締切、分流と合流、捷水路、わん曲部、みお筋や州の消長、狹窄部、各種形状損失、河口砂州、河口処理工、波浪遡上、取排水（密度流）などであろう。

模型実験の特質としては、以上の考察に基づき、容易に次のような特徴を挙げることができよう。それらは

- (1) 解析的あるいは数値的な解の得がたい場合でも実的に解きうる。
- (2) 模型においては複雑な境界条件でも非較的容易に作ることができる。
- (3) 多数のケースを非較的容易に研究することができる。
- (4) 流れによる境界の変化、さらにその変化による流れの変化を研究することができる。
- (5) 研究の時間が少なくて済み、費用も僅少ですむ。

などである。模型実験のその他の利点としては、実際に模型上の現象を眼で見られるということである。模型上においては、いろいろの現象が再現され、問題を検討するための素材が与えられる。場合によっては、模型は当該地域の住民にも開放され、その理解のたすけともなりうる。複雑な物理現象が容易に理解され、素人わかりするのがよい。そして問題を考える時間が与えられることにもなる。模型実験の依頼者は、しかるべき機関に実験を依頼すれば自然に解が得られると考えるべきではない。模型実験を実際に、討議に参加することを怠っては、実験の意義は半減するというものであろう。模型上の三次元現象には、いろいろの見方がある。それによって新たな問題点の発見にもつながり、改修上の有益なアイデアを生み出すことにもなり得るのである。

3. 相似律の基礎

模型実験実施上の問題点を考察するうえに必要となるので、模型実験の相似法則について述べる。

模型実験とは、実物の現象を支配している基礎方程式を模型によって解くことであり、力学的に相似な模型によって現象を知ろうとするときには、実物と模型において同一の方程式が成立し、その解が同じ形にならなければならない。^[2] したがって、模型は実物に幾何学的に相似にし、境界条件が同一とならなければならない。この意味において、模型に歪を持たせることは厳密性を欠く。ただし、基礎方程式に歪の影響が入らない場合は、この限りではなく、かえって歪模型の方が都合のよいこともある。このように、基礎方程式において省略しうる項は模型と実物において同じであればよく、このことは逆に、そこに相似則の一つの限界の存在を示唆する。

3-1 三次元流れの相似条件

直交座標系における三次元流れの場合、運動方程式として Navier-Stokes 式を適用すると、

$$\mathbf{V}t + (\mathbf{V} \cdot \text{grad}) \mathbf{V} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad} \mathbf{P} + \nu \cdot \nabla^2 \mathbf{V} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $\mathbf{V}$, $\mathbf{P}$, および $\mathbf{F}$ はそれぞれ流速、圧力、および外力のベクトル表示、 ρ は密度、および ν は動粘性係数とする。(1)式において実物量に subscript p を、また模型量に m をつけることにすれば、実物および模型に適用する式が示される。相似則によれば実物と模型において流れが相似であるためには、それぞれの基礎式において相対応する各項の比が等しくなければならない。この条件は、いま、 $u_p/u_m = u_r$, $t_p/t_m = t_r$, などと書きかえると、

$$\frac{u_r}{t_r} = \frac{u_r^2}{x_r} = \frac{v_r u_r}{y_r} = \frac{w_r u_r}{z_r} = X_r = \frac{P_r}{\rho_r x_r} = \frac{\nu_r u_r}{x_r^2} = \frac{\nu_r u_r}{y_r^2} = \frac{\nu_r u_r}{z_r^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{v_r}{t_r} = \frac{u_r v_r}{x_r} = \frac{v_r^2}{y_r} = \frac{w_r v_r}{z_r} = Y_r = \frac{P_r}{\rho_r y_r} = \frac{\nu_r v_r}{x_r^2} = \frac{\nu_r v_r}{y_r^2} = \frac{\nu_r v_r}{z_r^2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{w_r}{t_r} = \frac{u_r w_r}{x_r} = \frac{v_r w_r}{y_r} = \frac{w_r^2}{z_r} = Z_r = \frac{P_r}{\rho_r z_r} = \frac{\nu_r w_r}{x_r^2} = \frac{\nu_r w_r}{y_r^2} = \frac{\nu_r w_r}{z_r^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。ここに、 u, v, w は $\mathbf{V}$ の、また X, Y, Z は $\mathbf{F}$ の x, y, z 方向のそれぞれの成分である。模型において、実物と同じ温度の水を用いる場合には、 $\rho_r = \nu_r = 1$ である。また、同じ重力の場で実験を行なうから、重力加速度 g については $g_r = 1$ である。(2)~(4)式の最後の3つの項は粘性項から由来するものであり、たとえば(2)式から、

$$\frac{\nu_r u_r}{x_r^2} \div \frac{u_r^2}{x_r} = 1 \quad \therefore \frac{u_r x_r}{\nu_r} = \text{Re}_r = 1$$

となり、Reynolds 数 Re が実物と模型で一致しなければならない結果となる。通常、河川の模型実験では Re が十分に大きく、その影響がほとんど無視できる領域を考えて実験を行なうこととし、(2)~(4)式の最後の3つの粘性項を省略する。このとき、(2)~(4)式は

$$t_r = x_r/u_r = y_r/v_r = z_r/w_r \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$x_r X_r = y_r Y_r = z_r Z_r \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$x_r u_r = y_r v_r = z_r w_r \quad \dots\dots\dots(7)$$

に帰着する。

実物と模型が Re 数の影響のない範囲で相似であるためには、(5)~(7)式が同時に成立しなければならない。したがって、(5)式と(7)式より

$$u_r = v_r = w_r \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。(8)式を(5)式および(6)式に代入すると、

$$x_r = y_r = z_r \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$X_r = Y_r = Z_r \dots\dots\dots 00$$

などが得られる。(9)式の意味するところは、基礎方程式(1)式が成立するためには歪度が1でなければならないということである。

3-2 一次元流れの相似条件

二次元的な流れは(9)式より水平方向の幾何学的相似が得られれば問題ない。そこで、一次元の流れの場合について考察する。非定常不等流の一般式は

$$U_t + U \cdot U_x + g h_x + g z_x + g I = 0 \dots\dots\dots (11)$$

である。ここにUは断面平均の流速、hは水深、Zは水路床の高さ、およびIはエネルギー勾配で、chezy式によれば $I = v^2 / (c^2 R)$ 、Manning式によれば $I = n^2 U^2 / R^{4/3}$ である。三次元流れの場合と同様にして、実物と模型とで(11)式が同時に成り立つ条件を求めると、

$$\frac{U_r x_r}{g_r t_r h_r} = \frac{U_r^2}{g_r h_r} = 1 = \frac{U_r^2 x_r}{C_r^2 R_r h_r} \dots\dots\dots (12)$$

の関係が得られる。すなわち、(12)式の示すところによると、水平縮尺 x_r および鉛直縮尺 h_r に対する拘束条件はないので、歪度 $\alpha = x_r / h_r$ は任意に選定することができる。ただし、(11)式の条件は一方向流であり、 x 軸に垂直な断面内には他の流速成分が存在しないことを前提としている。なお、連続の条件

$$A_t + Q_x = 0 \dots\dots\dots (13)$$

は自動的に満足されている。ここに、Aは断面積、Qは流量である。

3-3 河床面の相似

固定床実験の場合は、歪度に合わせて河床面を幾何的に相似に作成しておけばよいが、移動床実験の場合は、河床面が時間経過につれて変形してゆく。この変形過程において、形状や変形速度が実物と模型で同一でなければならない。この河床変形の時間縮尺は、一般に Froude 則により求めた水流の時間縮尺と異なり、両方を同時に満足できないのが普通である。しかし、流れの不定流効果があまり大きくなければ、河床変化の相似性より求めた時間縮尺を模型に使った方が、より実物の現象にあった結果を得ることが期待される。

この場合、一次元の河床流砂の連続条件

$$\frac{\partial z}{\partial t_s} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{1}{B} \frac{\partial Q_T}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (14)$$

より、流水に関する相似則を求めたのと同様な方法で、

$$t_{sr} = (1-\lambda)_r \cdot x_r \cdot h_r \cdot q_{Tr}^{-1} \dots\dots\dots (15)$$

を得る。ここに、 λ は空隙率、 Q_T は全流砂量(容積)、 q_T は単位幅当りの流砂量、および t_s は流砂に対応する時間とし、流水に対応する時間 t と区別する。 q_T は浮遊砂および掃流砂を含んだ総流砂量としているが、細かい粒径の流砂よりなる浮遊流砂が、(14)式のようなかたちで模型範囲の河床変動に直接関与するか否かについてはなお議論のあるところである。しかし、ここではこのような議論は避けて、数ある流砂量公式の中で、例に掃流砂量に対して佐藤、吉川、芦田公式を、また掃流砂量に浮遊流砂量をも考慮した公式として Brown 型公式とを対象にして検討してみる。

佐藤、吉川、芦田公式(土研公式)は、掃流砂量 q_B を与えるもので

$$q_B = \frac{\varphi \cdot F(\tau_o / \tau_c)}{(\rho_s / \rho - 1) g} u_*^3 \dots\dots\dots (16)$$

である。ここに、 u_* は摩擦速度、 ρ_s は土砂の比重、 ρ は水の比重、 φ は n の関数として与えられる定

数、およびFは τ_o/τ_c の関数として与えられる定数である。 τ_o は掃流力、 τ_c は限界掃流力を表わす。したがって、 q_{Br} は以前と同様にして、

$$q_{Br} = \frac{\varphi_r \cdot F_r \cdot h_r^3}{(\rho_s/\rho - 1)_r x_r^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。いっぽう、Brown 型公式の場合には、

$$q_r = \alpha \frac{u_*^\beta}{g^2 (\rho_s/\rho - 1)_r^2 \cdot d_m} \quad \dots\dots\dots (18)$$

である。ここで、 α および β は定数であり、Brown 公式では $\alpha = 10$ 、 $\beta = 5$ である。 d_m は平均粒径とするが、本来ならば、掃流砂と浮遊流砂を同一の平均粒径で表わすことは困難であろう。Brown 型公式の場合も同様にして、

$$q_{Tr} = \frac{1}{(\rho_s/\rho - 1)_r^2 d_{mr}} \cdot \frac{h_r^\beta}{x_r^{\beta/2}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

を得る。以上の結果、河床変動に対応する時間縮尺 t_{sr} は(15)式の q_{Tr} に、(17)式の q_{Br} または(19)式の q_{Tr} を代入することにより得られる。

流砂現象の相似にとって、その他の重要な要素として、移動限界付近の現象と浮遊流砂による河床変動がある。河床材料の移動限界付近の流砂の相似には、その河床材料の限界掃流力が大きな影響力を有することは否めない。したがって、その地点の掃流力 τ_o と限界掃流力 τ_c の比 τ_o/τ_c が指標して重要であり、この τ_o/τ_c が実物と模型のうで同じならば、流砂条件はほぼ相似と考えてよいであろう。つぎに、浮遊している土砂の運動には、砂粒の沈降速度 W_o と流速 U の比が重要な要因となる。浮遊砂による堆積現象が重要な場合には、横型と現地で W_o/U が同一であることが望ましい。また、掃流砂量と浮遊砂量の比が同一となることも必要条件であるが、 W_o/U はこの条件を満たす一つの重要な指標でもある。

3-4 縮率

諸物理量の縮率をとりまとめると次のとおりである。

$$A_r = x_r \cdot h_r \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$Q_r = x_r \cdot h_r^{3/2} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$U_r = h_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$I_r = h_r \cdot x_r^{-1} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$n_r = h_r^{2/3} \cdot x_r^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$t_r = x_r \cdot h_r^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$t_{sr} = \frac{(1-\lambda)_r (\rho_s/\rho - 1)_r}{\varphi_r F(\tau_o/\tau_c)_r} \cdot \frac{x_r^{5/2}}{h_r^2} \quad (\text{土研式}) \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$= (1-\lambda)_r (\rho_s/\rho - 1)_r^2 \cdot d_r \frac{x_r^{7/2}}{h_r^2} \quad (\text{Brown 式}) \quad \dots\dots\dots (27)$$

4. 模型実験計画の基礎

近視眼的な河川改修は、上下流に歪を発生させ、将来の再改修を困難にする。同様にして、近視眼的な模型実験は害こそあれ、益は少ない。模型実験は限られた範囲の河道を対象とするが、この場合、河川全体を一つの生きたシステムとして把え、そのなかでの対象河道の位置づけが重要である。この意味において、模型実験を担当する技術者は、筋道のとおった思想を有する高度の中広い河川技術者であることが要

求される。すなわち、模型実験を実施する前段階において、将来の河道と河川環境の変化の予測を通じて、将来あるべき適正な河川の姿の検討が、実験を行なうに際して、実は非常に大切なことなのである。

模型実験を実施する場合には、以上のような観点からみて、現地資料の蒐集と解析、水力計算、境界条件の設定、および現地事情調査などの占めるウェイトが小さくない。

現地資料としては、模型実験を実施する問題点とその理由、河川の全体計画、計画量（計画流量、計画水位、計画法線、計画断面など）の資料とこれらの変更予定計画資料、河道の幾何学形状（縦横断面図、平面図、平水時の航空写真）とその経年変化図、河川構造物とその根入れ深さ、河床材料とボーリング資料、水理量（潮位、水位、流量、流砂量、 $H-Q$ 曲線、洪水痕跡、出水中の河床変動、および出水時の航測写真と表面流速分布図など）、水文量、災害記録と河川改修記録、上下流河川の河相と蛇行特性、およびその他の現地条件として、取水、航行、魚類の生態、地盤沈下、塩害、砂利採取、開発の方向や環境問題等社会条件などの資料が必要とされる。これらの資料は全て満たされなければ実験ができないわけではないが、十分な検討のためには以上の諸資料の整備が望まれる。

これらの現地資料は、その一次処理として、次のような整理をしておくとう便利であろう。すなわち、河道の経年変化（低水位下の平均河床高、最深河床高、みお筋および州）、河床材料（低水路および高水敷の縦断変化と粒度曲線）、流砂量（浮遊流砂量、掃流砂量、Wash load とその粒径）、粗度係数の経年変化、水位（平均低水位）、および下流端の水位—流量曲線などの経年変化、流量（洪水流量とその確率評価、最多流量）などであろう。

つぎに、これらの現地資料に基づいて水力計算を実施する。必要な計算としては、下流端水位として最高、平均、および最低のときの各流量に対する不等流計算、不定流計算、粗度係数の逆算、平均流速、掃流力、限界掃流力および流砂量計算、河床変動計算、動的および静的平衡河床縦断形状、および各種形状損失計算などであろう。

以上のような現地資料の解析や水力計算の結果、模型実験に必要な各種の境界条件や実験条件の設定のための基礎資料を得るわけである。

模型実験はその目的により、実験規模および内容が定まる。全ての水理現象を模型上に再現することは相似律によりほとんど不可能であるから、目的に応じて焦点の合わせ方が異なり、犠牲となるものが定められる。模型実験には当初の判断が重要である。この限りにおいて、現地資料の解析や水力計算のほかに、現地の河川の計画をあらかじめ相当しっかりつめておく必要がある。したがって、実験の依頼者と実験者とは十分の連絡をとり、依頼者も実際に実験をみ、実験計画に関与することが望ましい。

実験計画上の模型規模、種類、およびその問題点の現況等を列挙すれば次のようになるであろう。

- (1) 模型範囲：問題区間の上流へは上流流線とその変動特性（資料により交互砂州や砂礫堆の流下状況の把握）および補給砂の状況と補給方法により左右されるが、川幅の3～6倍程度（蛇行の影響が卓越するときは蛇行波長以上）が望まれ、下流側へは川幅の2～5程度で、基準量水標地点が含まれることが望ましい。これは河川の状況や実験目的にもよるが、現状はかなり短かい模型で実験が行われる場合がある。
- (2) 対象区間の河相が変化する場合は、固定床実験ではそれほど問題はないが、移動床実験では大変困難な実験になることが多い。そして、たとえば対象区域に勾配の急変点を含むような移動床実験の場合は移動床と固定床の混在した実験で解決できることもある。すなわち、勾配が急で河床材料の粗い上流部は移動床模型とし、勾配がゆるく流速が小さくて河床変動が少ない下流部の区間は固定床模型などとするのである。
- (3) 模型縮尺は大きい方が望ましいことが多いが、敷地、給水能力、予算および時間上の制約がある。下限

は水深（重要区間の水深は3 cm以上とし、粘性の影響を無視し得、かつ乱流域とする）、限界掃流力と流砂量の相似（対象流量が小さい範囲までの実験が必要なときにはかなり困難である）、および測定精度とその能力（通常、流速 $v > 5 \text{ cm/s}$ 、水位 H の精度0.1 mm、河床変動量1 mm）などにより判断され、これらの条件を満たし得ない場合には歪み模型とする。移動床実験では模型を歪ませる場合が多い。

(4)固定床実験と移動床実験表—1、水理量の変化による形状損失、流速分布および流況の変化をみるためには固定床実験がすぐれているが、河床変動の激しくないことが前提である。したがって、固定床模型実験のみによって結論を得る場合には、現地資料や河床変動計算によって、事前に模型区間の安定性について十分検討しておくことが必要である。いっぽう、洗掘と堆積の現象を調べるには移動床実験が直接的であるが、とくに粗度と経済性に難点がある。

表—1 固定床実験と移動床実験の比較

	主な実験内容	境界条件の与え方		問題となる相似率	費用	備 考
		水位、流量 条件の変化	形状の変化			
固定床実験	水位、流速 流量、流況	易	難	歪の影響 粗 度	小	現地河川に 大きな変化 のないのが 前提
移動床実験	流況、洗掘、堆積	難	易	歪の影響、されん 限界掃流力 流砂、補給砂 時間縮尺	大	

(5)実験水理条件=実験の種類によって平衡量と時間変化量が要求され、定流および不定流実験がある。このほか流量を段階的に変化させる実験もある。対象とする現象により、水理量の条件は異なるが、一般に流量と水位の実験条件は表—2のようである。ここで注意を要することは、計画の粗度係数が過大な場合があり、そのとき洗掘現象を調べる場合には、最小の粗度係数により与えられる下流端水位を与えて実験を行わなければならない。実験の水理条件は目的とする現象により定まるのであるが、その現象を予測することがそれ以上に重要であることは当然のことである。たとえば、洪水に対して安全な堰でも、下流水位の低いときの初期のゲート操作による放流時に著しい洗掘を受けたり、あるいは平水時に激しい洗掘を受けることがある。これは、特定の場所に補給砂を含まない、限界掃流力以上の掃流力を有する流水を長時間放流するからである。これは一例にすぎないが、模型実験にとって実験条件を決めることは慎重になされなければならない。それにより全体の実験計画が左右される。以上は極くあたりまえの些細なことであるが、数々の実験事例より得られた貴重な体験結果でもある。

表—2 実験水理現象と現象

下流水位 \ 流量	計 画 流 量	小出水（長時間）
最高 (n_{max})	計画水位、堆砂	堆 砂
平 均		蛇 行 流 況
最低 (n_{min})	洗掘、堆砂、流況	洗 掘

5. 模型実験法の推移と問題点

模型実験の歴史はかなり古い。しかし、本格的な模型実験は昭和に入ってからであろう。建設省土木研究所の赤羽の水理実験施設は昭和7年に完成しているが、初めての近代的な模型実験は昭和5年に発表された北上川降開式転動堰^[3]であった。昭和10年代は国策に沿った大陸関係の実験が注目され昭和20年代は外国技術の導入と基礎確立期とすることができよう。昭和30年代は大災害の多発と大型実験の時代であり、以降経済力の発展と共に実験予算の増大が目立つ。表－3は土木研究所における模型実験規模の推

表－3 実験規模の推移

実施場所	実験開始年	規 模	対 象	模型歪度	河 床	実施件数	備考
赤 羽 支 所	T. 15	小	構造物中心	1	移動床	少 量	室内
篠崎試験所	S. 27	中	河 道中心	1	固定床	3～5件/年	屋外
鹿島試験所	S. 36	大	河 道中心	1～2	移動床	8～10件/年	屋外

移を象徴的に示したものである。実験に対する認識と信頼が高まるにつれて、実験件数の増大と実験内容の進展がみられ、実験に必要な敷地面積も増大した。昭和27年には敷地面積約2万8千㎡の篠崎試験所が、さらに昭和36年には敷地面積約24万㎡の鹿島試験所が開設された。表－4は鹿島試験所において実施された昭和46年度の河川関係模型実験の課題名と模型規模を示す。鹿島試験所における予算は海岸関係の実験および基礎研究費を含めて、昭和40年度には約6千万円であったが、昭和46年度には約1億4千万円（17課題）と増大している。

つぎに、模型実験内容の推移をみてみよう。模型実験は河川改修事業に直接関係するものであるから、

表－4 河川模型実験諸元 （S. 46年度の鹿島試験所担当分）

課 題 名	模型範囲km	縮 尺		固定床・移動床の別	新計画流量 ㎡/S
		水 平	鉛 直		
淀川河道掘削，三川合流 大堰	7～40	1/100	1/40	固 移（砂）	12000
		1/60	1/60	移（石炭粉）	
利根川佐原地区低水路	35～46	1/60	1/40	移（石炭粉）	8000
利根川八斗島（低水路と合流点）	175～186.5	1/70	1/35	移（砂）	14000
信濃川長岡地区低水路	13～23	1/100	1/70	移（砂）	11000
		1/500	1/100 1/800	移（石炭粉砂）	
長良川低水路河道	2～14	1/60	1/40	移（石炭粉）	7500
大淀川河口処理工	（海部）－1.6～3	1/50	1/50	移（石炭粉）	8000
最上川河口処理工	（海部）－2.0～3.4	1/60	1/60	移（石炭粉）	9000
北上川一ノ関遊水池	248～38.2	1/100	1/20	固	11000
旧淀川河水排水	（淀川固定床模型）	1/100	1/40	固	330
長良川河口堰仮締切	2～14	1/60	1/40	移（石炭粉）	7500

改修内容と深い結びつきを有する。古くは、せきや水門、床固、水制などの構造物、および分流通合、^[4] 捷水路関連などの河道に関する模型実験が多く行なわれた。最近では、大規模河道掘削、大規模仮締切、蛇行特性、砂利採取、遊水池、^[5] 河口処理、^{[6][7]} 河道内波浪遡上^{[8][9]} および水質などの複雑な問題を包含する模型実験の増大が顕著である。初期の実験は、越流係数や構造物周辺の局所洗掘などの問題が中心で、小規模な室内実験として行なわれた。これは計算や現地調査資料とついでになって、あるいは補足するかたちで河道計画に資した。やがて、構造物を河道の中で把える必要が強調され、固定床の大型模型による実験が開始された。篠崎試験所の開設はこのような時期に該当するものと思われる。ついで、河川流域の開発に伴い、河道の変化が急速に進展するようになると、流砂が河道計画上の中心問題と考えられ、もはや一次元的な計算のみでは不十分との認識が高まった。それに伴い、固定床の実験から河床変動を推定する試みが多く行なわれたが、もとより十分な結果を期待することは困難であり、砂を用いた移動床実験がもてはやされるようになった。移動床実験が本格的に行なわれるようになったのは、模型の河床材料として石灰粉を用い始めてからで、比較的最近のことである。鹿島試験所の開設はこの時期にあたる。

模型は大規模になり、模型の長さが150 m～300 mは普通である。模型実験を行なう目的が多岐複雑になるにつれて、模型範囲の拡大、および水位、流況、河床変動などの再現性の精度が要求され、それが模型の大型化に拍車をかける。そこで、水平の縮尺を小さくして模型を歪ませることも多くなってきた。そしてまた、いっぽうでは実験結果に対して定性的なものから、定量的なものへと期待される内容に変化がみられるようになっていく。すなわち、従来は案の比較や量的なものへの判断材料とするにとどまっていたが、最近では、たとえば洗掘量の時代変化を求めるなど、その要求内容が高度のものになりつつある。このように、模型実験に期待し、かつその要請内容の高度化に伴い、また新たな実験技術上の問題点も生じている。^{[10][11]}

実験実施上とくに問題となり、未解決、あるいは検討を要する項目としては、検証法、歪の影響、および時間縮尺などがある。その他、移動床実験のされんの発生発達現象と粗度係数、均一粒径の実験河床材料の現象と現地混合粒径の現象の相異、限界掃流力、流砂量、および流砂型式（掃流、浮遊流、およびWash load）など多くの問題が残されている。また、実験施設、計測機械、およびデータ処理や図化なども改善を要する多くの問題点を有している。この場合、精度、実験に要する合計時間、人手不足、および経済性をも同時に考慮しなければならないであろう。

以下、順をおって各種の問題点について考察し、最近の実験技術の状況をみていくことにしよう。

6. 模型粗度の調整

河道内の運動過程は流水と流砂の運動によって規制される。実物と模型では Re 数も異なるから、一般に何んらかの縮尺効果が存在する。相似律によれば、模型の Re 数が十分大きいとき、 Fr 数が一致し、かつ粗度係数が理論値どおり縮尺されていれば、縮尺効果は無視しうる。流線は水理量一定のとき、主として河道の幾何学形状と粗度に支配される。前者は模型が実物と相似であればよく、後者も粗度の縮尺関係が適当であれば、流線が相似になることが、Bijkerら^[12]により明らかにされている。

したがって、固定床模型では一般にあまり問題はない。通常小石をモルタルペーストにまぶして粗度づけすることが多い。粗度は一般に流量や水深により変化するので、対象とする水理量近傍の粗度に合わせる。しかし、模型を歪める場合には模型の勾配が急になるので、相当大きい粗度石を必要とすることがある。このような場合、模型上の流水の有効水深が減少し、Froudeの相似条件が崩れることになる。とくに貯留量が問題となる場合には、厳密にFroude則を満足させなければならないので、大きい粗度石は適当

でない。北上川遊水池の模型実験（歪度5）^[5]では適当間隔に金網を設置してみた。ゴミの付着を防御すれば良い結果が得られるようである。

模型の粗度は、現地と水位を一致させる方法と粗度係数を一致させる方法がある。これはどちらでもよい。しかし、厳密に合致させることは容易でない。淀川中下流部の計画河道は複断面形状となっている。高水敷の利用も計画されているので、出水時の高水敷上の流況も重要な研究課題であった。したがって、出水時にも大部分の水は低水路を流れるのであるが、高水敷の粗度も精度よく調整する必要がある。計画河道の高水敷上の粗度石の配列は、現状河道の高水敷上の粗度石配列と同様とすることとした。そこで、現状河道の低水路と高水敷に適当な粗度石を配置し、それぞれの河道の粗度係数と水位を満足する粗度石の配列方法を得た。淀川ではかなり大きな洪水流の航測写真による表面流速分布図があるので、表面流況を模型と実物とで比較したところ、粗度の条件は、ほぼ満足されているにも拘わらず、判然とした相違があった。そこで、高水敷上の粗度石を、水位が変化しない範囲でいろいろと変化させたところ図-1に示

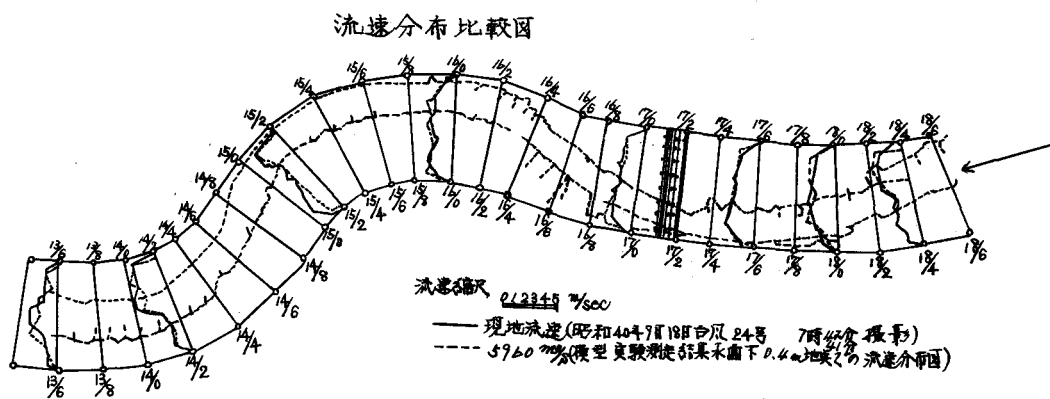


図 - 1 淀川河道部における表面流速分布の比較（検証）

すように、表面流速分布と水位とを同時に満足する粗度石の配列方法を得た。これは、粗度石により粗度係数を調整しようとしたことと、粗度が厳密には満足されていなかったことによるものと思われる。すなわち、水位がほぼ満足されている状態でも、河床におく粗度石の配列の仕方により流速分布が異なることが判明した。この現象は、とくに高水敷において顕著に現われ、低水路と高水敷の境界付近の現象に着目するときなどに留意を要する。

つぎに、移動床模型の場合には、河床材料と水理量にみあった砂れんが発生するので、固定床実験のように粗度石や金網により粗度調整をすることは容易でない。砂れんの発生発達とその粗度の関数が判明すれば、模型の歪度を適当にとることにより、移動床模型の粗度を自然に合わせることは理論的には可能である。しかし、水理量が変化する度毎に模型の歪度を変えるわけにもいかないのではなかなか困難なことである。

いま、河床の抵抗を表わす粗度係数n の代りに、摩擦損失係数f の相似性を考えてみる。f は

$$f = \frac{1}{2} \left(\frac{U}{U_*} \right)^2 = \frac{2gn^2}{R^{1/3}} \dots\dots\dots (28)$$

である。したがって、 $f_r = f_p / f_m$ は

$$f_r = \frac{g_r n_r^2}{R_r^{1/2}} = \frac{h_r^{4/3} x^{-1}}{h_r^{1/2}} = h_r \cdot x^{-1} \quad \dots\dots\dots (29)$$

となる。これより、 $h_r = x_r$ の場合には $f_r = 1$ 、つまり $(U/U_t)_r = 1$

となり、模型と現地において、平均流速と摩擦速度の比が同一なら粗度の相似が成立していることになる。平均流速公式として付数公式が適用されるとき、 $(U/U_*)_r = 1$ となるためには $(R/k_s)_r = 1$ 、つまり $(k_s)_r = h_r$ でなければならない。ここに k_s は相当粗度とする。河床が flat bed であるとき、 $k_s \propto d$ であり、 $d_r = h_r$ とすれば、ほぼ河床の粗度を合わせることができる。しかし、河床は流れの強さ等によって、Ripple, Dune, Antidune, などと河床形態を変化させ、flat bed のように砂粒による摩擦抵抗以外に、砂れん形状の抵抗を含む。したがって、河床形態を決める無次元量を横型と実物で同一とすることが必要であろう。Engelund は、同一の河床形態を持つ流れでは粒子せん断力（有効せん断力） τ'_t は、河床せん断力 τ_t のみの関数となると主張している。

$$\tau_* = \frac{U_*^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd} = \frac{RI}{(\rho_s/\rho - 1)d} \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$\tau'_* = RI'/\{(\rho_s/\rho - 1)d\} = R'I/\{(\rho_s/\rho - 1)d\} \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$U = \sqrt{gR'I} \{ 6.0 + 5.75 \log(R'/2d) \} \quad \dots\dots\dots (32)$$

とすると、 $\tau_{*r} = 1$ 、 $\tau'_{*r} = 1$ となるためには、 $d_r = h_r$ 、かつ $\{(\rho_s/\rho - 1)d\}_r = 1$ が必要である。同様に Garde や 椿らの方法による河床形態の領域区分を決める無次元量からも、 $d_r = h_r$ 、 $\{(\rho_s/\rho - 1)d\}_r = 1$ が必要である。砂れんは砂の粒径が 0.6 mm 以上の場合にはほとんど形成されないといわれ、また Ripple と Dune の区分には、他の物理量、たとえば U_*d/ν などが関係すると考えられているが明確ではない。

砂れんの発生する領域では $d_r = h_r$ 、 $\{(\rho_s/\rho - 1)d\}_r = 1$ としても粗度の相似条件は満足されていないと考えてよい。実際の問題としては、模型の砂の粒径は非常に小さいものが要求されるが、入取難であり、シルトの性質をおび粒子の運動機構も異ってくるので、比重の小さい、大きい粒径の材料を使い、無次元掃流力 $\tau_{*r} = 1$ の条件だけでも成立させようとするのが普通である。

ここでは、粗度条件が満足されなかった場合に、どういう現象が発生するかを理解しておく必要がある。一般に、粗度が大きすぎる場合には流線が曲がり過ぎ、粗度が小さすぎる場合には流線は過度の直線性をおびてくる。その程度は河道の状況による。たとえば、水深が川幅に比して大きい場合には河床粗度は大きい影響力を持たないが、逆の場合には河床粗度が流況を支配するので重要である。流線は主として Froude 数と水深／川幅比に影響を受ける。すなわち、粗度が大きすぎる場合には、Froude 数が小さく、水深／川幅比が大きくなり、これは共に流線を曲げる作用を有する。実際にはこのケースが多い。したがって、実験結果の解釈には、（たとえば洗堀位置や洗堀深の補正には）歪のための基礎実験の結果を参照する必要がある。

また、通水時間の経過とともに、河床のされんが発達し、粗度が増大（減少もある）するので、予備通水することもある。

模型の粗度が満足されず、Froude 数が実物と異なるために生ずる縮尺効果について考察する。縮尺効果は、あるパラメーターの尺度が定数ではなく、空間的および時間的に変化するときを生ずるといわれる。つまり、そのパラメーターの尺度が、他のパラメーターの尺度のみの関数ではなく、それらのパラメーター

自身の関数でもあるからである。たとえば、図-2はエネルギー水頭の尺度 H_r の変化を示す。^[13] ベルヌーイ式により、全水頭 H は

$$H = h + U^2 / 2g \quad \dots\dots\dots (33)$$

と表わされ、したがって、

$$\frac{H_r}{h_r} = \frac{H_p}{H_m} \cdot \frac{h_m}{h_p} = \frac{1 + \frac{1}{2} F_{r,r}^2 F_{r,m}^2}{1 + \frac{1}{2} F_{r,m}^2} \quad \dots\dots\dots (34)$$

が得られる。つまり、エネルギー水頭の尺度 H_r が水深の尺度 h_r と流速水頭の尺度の関数であるばかりでなく、それ自身のパラメーター $F_{r,m}$ の関数により表わされることを示す。このことはFroudeの条件

($F_{r,r}=1$ または $U_r=\sqrt{h_r}$) が満足されていないければ、縮尺効果が存在することを明らかにしている。 $F_{r,m}$ は模型の中で変化しており、 $F_{r,m}$ の大きいほど、縮尺効果が增大することは重要な意義を有するものであろう。したがって、とくにFroude数の小さくない実験の場合には、模型上の粗度の未調整により、Froudeの条件がどの程度相違してくるかに留意する必要があるだろう。

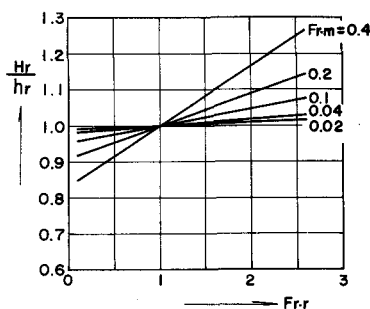


図 - 2 Froude condition; scale effects

7. 歪縮尺の影響

7-1 歪模型の意義と問題点

一次元流れを対象とするときは、歪縮尺の影響はないが、三次元流れの場合にはその影響が発生する。すなわち、流体運動の相似性から判断すると、厳密な意味での物理的意義を失う。とくに水平軸渦は全く異なったものとなり、流速分布の状態も変わる。わん曲での流れや河床変動のパターンには顕著な影響を与える。場合によっては非定常流効果も生じるようである。また、移動床実験では砂や石炭粉など河床材料の安息角の条件が加わり、相似条件が維持できない。しかし、いっぽうでは実験敷地、給水能力、実験費用、および時間的制約や移動床実験における粗度調整など、模型を歪ませる必要条件が存在する。そして、層流になる恐れのあるときには水深を大きくして乱流とし、流速を大きくして掃流力を増大させ、かつ、表面張力の影響を相対的に無視できる範囲におさめなければならないであろう。また、水面において不規則に変動する波の影響を小さくし、水深測定の実差率を減小させ、測定器のプロープの影響の発生をおさえ、かつ流速測定可能な範囲に流速を増大させる必要があるであろう。

したがって、模型を歪ませる影響が明らかとなり、その補正法が確立されれば、歪模型実験の方が得策のこともある。ただし、現象論的にはやむを得ず歪めるのであるから、模型は可能な限り大規模模型とし、歪度はできるだけ1に近づけるべきであろう。また、河川の状況や実験の目的によって歪の限界が存在するはずである。表-5は鹿島試験所において昭和45年度以前に終了した模型実験の歪度を示す。目的によってはかなり模型を歪ませることもできるが、洗堀量や洗堀位置などを問題とするときにはあまり歪ませていない。歪ませることにより、実験目的にそぐわない結果が期待されるときには最小限の歪度におさえることが大切である。この場合に実験用河床材料として、限界掃流力の小さいものを選び、限界掃流力の相似条件に近づけることが望ましい。このような河床材料として、これまで各所において研究されて来

表－5 模型の歪度（45年以前・鹿島）

模 型	目 的	河床	x_r	h_r	歪 度
利根川下流部	不定流河口堰	固定床	100	20	5
"	わん曲部	移動床	100	50	2
多摩川下流	橋 脚	移動床	60	60	1
木曾川川島	分流 合流	移動床	60	60	1
球磨川下流	わん曲部	固定床	50	50	1
長 良 川	堆砂 低水路	移動床	100	64 50	156 2
富士川下流	橋脚護岸	移動床	50	50	1
久 慈 川	河口処理工	移動床	40	40	1

^[14]たが、比較的安価で大量に入手可能であり、粒径毎の比重が不変で、水中で安定しているものとして、最近では石炭粉が多く用いられている。これも相つぐ炭鉱の閉山のため、近い将来の入手難と値上げが予想されるので、次の実験用河床材料の開発研究が必要であろう。

歪模型実験の問題点として、その他勾配が急になるから、模型の粗度ならびに流れの抵抗に注意する必要がある、河床砂の安息角、流量係数（形状損失）、および構造物周辺の局所流と局所洗掘などについて十分な検討を要する。

実際に、歪模型により実験を行なう場合には、洗掘特性や流況などについて別個に小水路にて実験を行ない、模型実験結果の補正を行なうことが望まれる。以下に、歪の影響に関する二、三の実験結果について述べる。

7-2 各種歪模型実験による考察^[15]

歪度がそれぞれ1.0、1.4、2.5および5.0である4種類の縮尺をもった実際の移動床模型（信濃川長岡地区）を用いて、河床変動、流況、および水位などについて、わん曲部の渦や側岸の法面勾配の影響といった局所的なものよりむしろ大きく全体的な相似性について歪の影響を考察してみた。模型は水平縮尺1/100（信濃川13～23 km区間）のものと、1/500（11～29.5 km）のものを作成した。表－6において、模型No.2およびNo.3は堤防法勾配が正しく縮尺されておらず、それぞれNo.1およびNo.4の法勾配と等しくなっている。実験No.4では河床勾配が非常に急になるため、流水の勢力を人為的に減ずる試みとして、19.5 km

表－6 信濃川河道実験の模型諸元と水理量（実験結果）

	縮 尺		歪度	河床材料		Froude数		径深・川幅比 $R/B(6000\%)$	τ_o/τ_c の目安	時間縮尺	
	X_r	h_r		材質	d_{60} mm	6000m ³ /s	3500m ³ /s			Froude	土研式
現地量	—	—	—	砂	25	0.483		0.0066	0.9	—	—
模 型 量	No.1	100	100	10	砂	0.23	0.251	0.0049	1.1	100	100
	No.2	100	70	14	砂	0.23	0.266	0.0072	3.3	120	204
	No.3	500	200	25	石炭粉	0.21	0.181	0.0167	7.6	354	4612
	No.4	500	100	50	石炭粉	0.21	—	0.473	—	500	18447

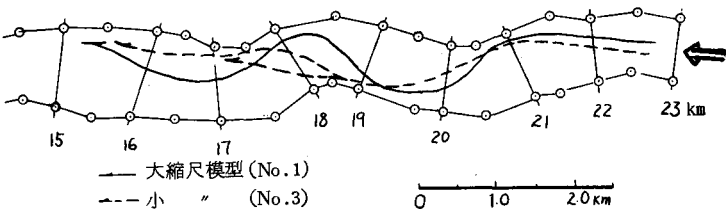
より上流に金網（網目 25 mm, 径 2 mm）を 20 cm 間隔に張った。これは横断方向には左右岸堤防間全面、深さ方向には河床中より水面上までとした。金網による流砂に対する阻害の程度はわずかであって無視し得る。

模型において、Froude 則に基づく流量を通水したところ表一 6 に示す F_r 数が得られた。No. 1 ~ No. 3 の模型においては、砂れん粗度が過大で、水深が大きく、Froude 数は現地量に比し過小となっている。 F_r 数は、Manning 式を用い、 $B \gg h$, $R = h$ とすると、

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}} = \frac{1}{n\sqrt{g}} h^{\frac{1}{6}} I^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (35)$$

で表わされるから、粗度係数や水深によって調節可能である。模型の大きさや使用している河床材料が異なるから、この実験結果からただちに一般的に論じることができないが、模型の粗度が大き過ぎる場合には歪度を大きくする方向で F_r 数を調節できることが多い。実験 No. 3 では実験目的により石炭粉を使用しているが、砂を用いるときにはさらに大きい F_r 数が期待されるであろう。また、実験 No. 4 のように人為的に粗度を調節して目標とする F_r 数を得ることもできよう。縮尺効果が問題となる場合には、 F_r 数を厳密に合わせる必要があるが、その調整方法としては、この他に、河床材料を変える方法、流量を適当に調節する方法、あるいは模型全体（歪ませるのではなく勾配のみを変える）を傾ける方法などが考えられる。いずれにせよ、この実験結果は、移動床実験において F_r 数が大幅に目標値からはずれる可能性のあることを示している。留意すべきことであろう。そして歪度はこの限りにおいて 1 つの自由度を与えるものである。

つぎに、流況については F_r 数が実物と異なるので、模型のあいだの比較を行なう。ただし、 F_r 数の 0.25 ~ 0.5 程度では流況に及ぼす F_r 数の影響はあまり大きくないので、No. 1 および No. 2 の歪度の小さい実験の結果は現地流況にはほぼ一致していた。歪度 1.0 および 1.4 の実験 No. 1 および No. 2 の実験のあいだにはその差があまり見られないが、No. 1 と No. 3 とでは図一 3 に示すように顕著な相違がみられる。その主要原



図一 3 模型別流況図（信濃川）

因は表一 6 に示す径深／川幅比であろう。すなわち、歪度の増大に伴う急勾配化により水流の持つ運動エネルギーが増大し、かつわん曲の二次流の強度が相違することに基づくものであろう。その結果、大きい R/B の場合に流線が直進性を有することになると考えられる。

流況は河床変動に伴って変化する。その河床変動を左右するものは流況であるが、直接的には掃流力と補給砂のバランスである。河床変動の例を示すと図一 4 のようである。模型を歪めると河床変動の特性が相当異ってくることが明らかである。現地量との比較は実験の F_r 数が小さすぎるので複雑であるが、流線の状況から判断して R/B の値がかなり重大な要素となっていると考えてよいであろう。なお、図一 4 において時間的な要素は表一 6 に掃流力／限界掃流力比 τ_s/τ_c , および時間縮尺の計算値が示されているので、概略の位置づけはなされるであろう。この実験の結果、交互砂礫堆などの蛇行の問題は水深の効

果が効いてくるので、歪模型は極力避けるべきことが明らかである。

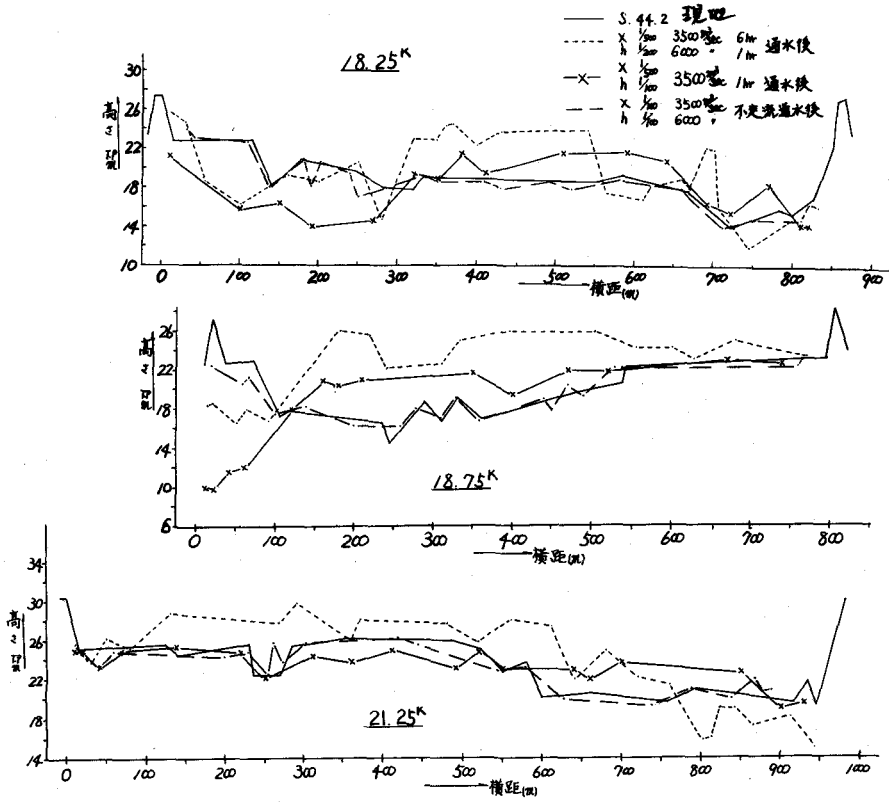


図 - 4 河床変動図 (信濃川)

7-3 わん曲部の流況と河床変動におよぼす歪の影響

粘性を無視した定常流の Helmholtz の方程式は、円柱座標 (ξ, η, ζ) で示せば

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \frac{V^2}{2} + v_{\zeta} \Omega_{\eta} - v_{\eta} \Omega_{\zeta} = F_{\xi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \xi} \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{V^2}{2} + v_{\xi} \Omega_{\zeta} - v_{\zeta} \Omega_{\xi} = F_{\eta} - \frac{1}{\rho \xi} \frac{\partial p}{\partial \eta} \quad \dots\dots\dots (37)$$

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} \frac{V^2}{2} + v_{\eta} \Omega_{\xi} - v_{\xi} \Omega_{\eta} = F_{\zeta} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \zeta} \quad \dots\dots\dots (38)$$

である。ここに、 v_{ξ} , v_{η} , v_{ζ} および F_{ξ} , F_{η} , F_{ζ} はそれぞれ (ξ, η, ζ) 軸方向の流速成分および外力成分、 $V^2 = v_{\xi}^2 + v_{\eta}^2 + v_{\zeta}^2$ である。また

$$\Omega_{\xi} = \frac{1}{\xi} \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \eta} - \frac{\partial v_{\eta}}{\partial \zeta}, \quad \Omega_{\eta} = \frac{\partial v_{\xi}}{\partial \zeta} - \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \xi}, \quad \Omega_{\zeta} = \frac{1}{\xi} \left(\frac{\partial \xi v_{\eta}}{\partial \xi} - \frac{\partial v_{\xi}}{\partial \eta} \right) \quad \dots\dots\dots (39)$$

はそれぞれ (ξ, η, ζ) 軸方向の渦度成分である。 Ω_{ξ} および Ω_{η} はともに水平軸をもった渦度であり、 Ω_{ζ} は鉛直軸を中心とする渦度である。ここで、圧力に静水圧分布を仮定することができれば、(36) 式～(38) 式の相似性が成立する条件は、

$$\Omega_{\xi r} = \frac{x_r}{h_r} \cdot \frac{1}{v_{\zeta r}} = \frac{1}{v_{\eta r}} \quad , \quad \Omega_{\eta r} = \frac{x_r}{h_r} \cdot \frac{1}{v_{\zeta r}} = \frac{1}{v_{\xi r}} \quad , \quad \Omega_{\zeta r} = \frac{x_r}{h_r} \cdot \frac{1}{v_{\eta r}} = \frac{x_r}{h_r} \frac{1}{v_{\xi r}} \dots\dots (40)$$

である。歪度1のとき、模型と実物の各渦度の比は等しくなって、 F_r から得られる流速縮尺と逆数の関係になる。歪模型の場合には、鉛直軸渦の比 $\Omega_{\zeta r}$ の縮率のみが他と異なり、歪模型の鉛直軸渦は、実物のそれ、および他の水平軸渦の歪度の倍数になる点が注目される。なお Helmholtz の基礎式において v_{ζ} を無視しても (40) 式と同じ関係がでてくる。また、運動式や連続式からは

$$v_{\xi r} = v_{\eta r} = (x_r/h_r) v_{\zeta r} \dots\dots\dots (41)$$

の関係が得られる。

以上のような渦度成分の差は、わん曲部の終端などの比較的単純な場合を考えれば、 ξ 方向(横断方向)の流速勾配 $\partial v_{\eta}/\partial \xi$ が歪度がある場合には歪がない場合の歪度倍になっていることを意味しているわけであるから、こうした渦度の水路方向での拡散状況異ってくることに差ができると思われる。その結果、歪模型においては流速分布、および河床変動などに顕著な差が現われることになる。なお、わん曲部内における横断水面形は、鉛直方向の平均流速 $\bar{v}_{\eta} = \frac{1}{h} \int_0^h v_{\eta} d\zeta$ によって、近似的に

$$g = \frac{dH}{d\xi} = \frac{\bar{v}_{\eta}^2}{\xi} \dots\dots\dots (42)$$

と表わされる。(42) 式に基づく計算値は実験値とよく一致し、わん曲水路内における水面形は非較的容易に算出される。流速分布の問題を別とすれば、(42) 式は歪の影響を受けないことは明らかである。

つぎに、二、三の実験結果について述べる。実験水路は幅 1.5 m、中心曲率半径 3.75 m の 90 度わん曲を 2 個有する複わん曲水路である。底勾配を 1/2500、3/2500、5/2500 とし、歪度 1.35 の実験を行った。¹⁷⁾

図-5 は粗度を調整し F_r 則にしたがって行った歪度の実験結果 ($F_r = 0.36$) で、上流わん曲の末端で、かつ下流わん曲部の始端の断面内における流速分布を示す。

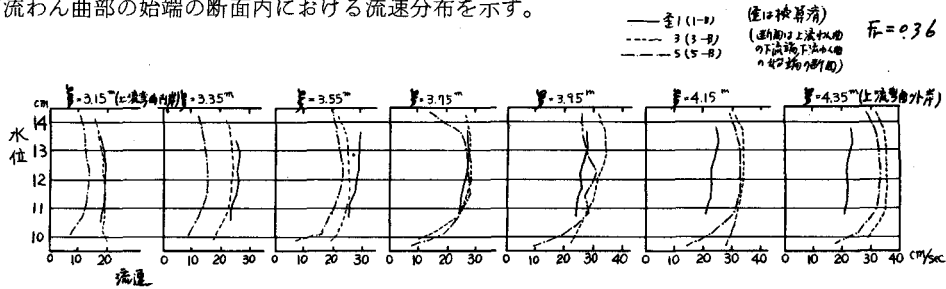


図-5 横断方向流速分布の比較

この図より、水路中央部では歪の影響は顕著でないが、 $\xi = 4.35$ m の点は上流わん曲の外岸であり、歪度が 3 および 5 のものは外岸の大きい流速がさらに加速されて下流わん曲部の内岸に流入しており、 $\xi = 3.15$ m の点ではその逆のような流速になっていることなどが知られる。これは渦度の条件式などからも理解されるところである。

図-6 は同じ複わん曲水路において実施した移動床実験の結果を比較したものである。各歪の模型とも、それぞれ $\tau_c/\tau_c = 2$ となるように均一な河床材料(砂)の粒径を調整してあり、 F_r 数は 0.3 である。また、流砂の移動型式は掃流が支配的であるので、佐藤、吉川、芦田公式を適用して時間縮尺を求めた。わん曲部のうち、第1わん曲 45°断面や第2わん曲 60°断面あたりは非較的傾向が似ているが、第2わん曲の流入断面や上流第1わん曲流の影響を受ける第2わん曲 30°断面、および第2わん曲の末端から下流 1 m の断面では、鉛直軸渦の消長に関連した洗堀が明瞭である。なお、第2わん曲 30°および 60°断面

の歪度3の河床形状には、大きい砂堆の断面が現われているので水路中央部の河床が極端に低下している。

このような河床変動の特性は、歪度による流線変化の特性からも理解される。図-7は同じわん曲水路の実験結果で、表層流線と底層流線におよぼす F_r 数と h/B の影響を示す。とくに水深の影響が大きいようである。図-7の曲線は長方形断面水路における流況であるが、この流線形状は河床形状の変形に伴って大きく変化するものである。それがまた、河床変動に支配的要因となるので、歪模型の河床変動実験の結果の判断が大変むずかしいものとなる。したがって、歪模型により模型実験を行なうときには、あらかじめ歪度のおよぼす特性について基礎実験などにより実験結果の補足修正ができるように準備しておくべきであろう。このことは、わん曲部だけに限らず、たとえば大型仮締切の洗堀特性^[18]を調べるときなども同様である。

なかでも、わん曲部内の局所的な洗堀が問題とされる場合には、砂の安息角はもとより、護岸の勾配や護岸の粗度が無視できない影響を与える。^[19]すなわち、局部洗堀に支配的ならせん流は、護岸付近においてその形状や粗度要素によって変化するからである。したがって、護岸の粗度は歪模型の縮率によって縮尺されたものが、第1近似としては必要であるが、局所的な特殊な流れに作用する程度が河床の摩擦と同様であるか調査することが望ましい。また、護岸の形状は局所流を強く支配するので、護岸の勾配が歪模型において、相似則どおりの作用を有するか詳細な基礎的検討を必要とする。

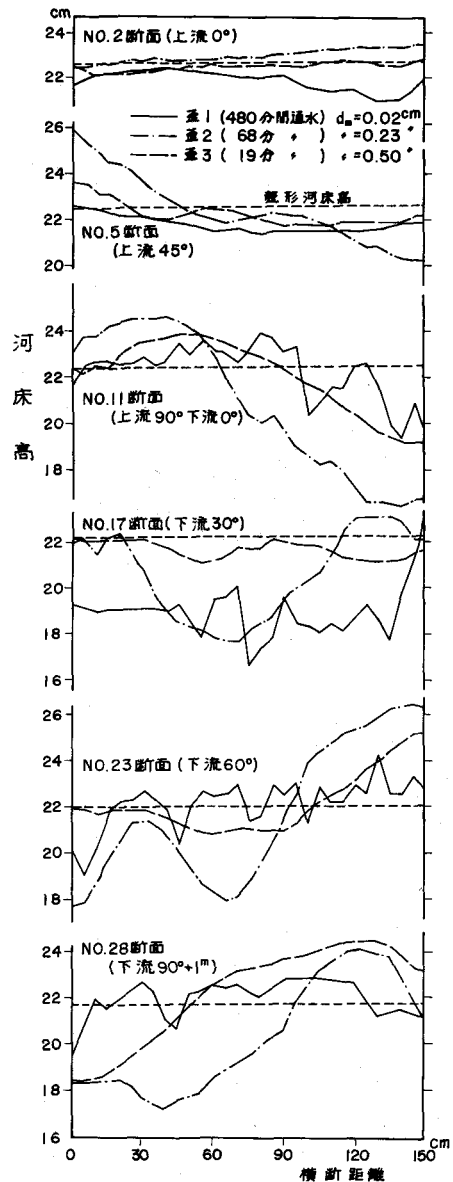


図-6 河床変動横断の比較

8. 移動床実験の時間縮尺

移動床実験結果の定量判断、および不定流実験などが実験目的の対象とされる場合には、時間縮尺の決め方が重要である。一般に、非定常性が強く貯溜が問題となる場合には、 F_r 則から定められる時間縮尺 t_r を重視する必要があるが、河床変動に重点がおかれる場合には流砂の関係から求められる t_{sr} が意義を持つ。ただし、 t_{sr} は採用する流砂関数によってかなり異った計算結果が得られる。模型における流砂特性は多くの場合に、二次元的な基礎実験の範囲内であるのでよく把握されている。模型河床材料とし

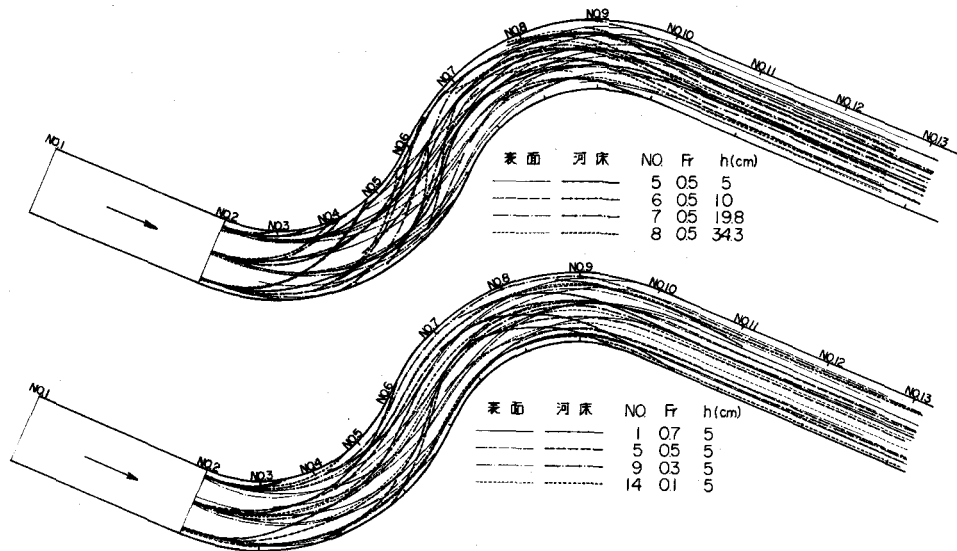


図-7 流線比較

て砂を用いる場合には、たとえば佐藤、吉川、芦田公式、石炭粉の場合には浮遊が含まれているので Brown 公式などの適合性のよいことが確かめられている。したがって、河川の現地における流砂関数が実測等によって把握されている場合には t_{sr} の精度を相当高めることができる。しかしながら、現地と模型とで流砂関数形が異なる場合には一般に流量の関数となる。長良川下流部の実験では現地実測式と模型における石炭粉の実験式を用いて時間縮尺を定め、良い結果を得た。最上川河口部河道の実験では $t_r = 7.75$, $t_{sr} = 25.6$ (佐藤、吉川、芦田公式), $t_{sr} = 4.24$ (Brown 公式, $d_p = 0.6 \text{ mm}$, $d_m = 0.2 \text{ mm}$, $\rho_m = 1.5$), $t_{sr} = 244$ (現地に佐藤、吉川、芦田公式, 模型に Brown 公式) であった。 $Q_p = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$ のとき、Brown 公式による流砂量の計算値は佐藤、吉川、芦田公式による計算値の約 100 倍であり、実験検証が必要である。 $t_{sr} = 25$ および $t_{sr} = 40$ のとき、水位の時間変化および河床変動量を模型と現地とで比較すると図-8 および図-9 のようである。移動床実験では水位が合わないのはやむを得ないこととして主として、河床変動に注目するのであるが、水位についても、最少限の最高値などに対する要請が強い。水位・時間曲線に対する影響要素としては、 t_r によらないときに貯溜、砂れんの発達による粗度の変化（通常、減水期に模型水位が高い）、粗度変化に伴う流砂量の変化、補給砂量の不適および流砂関数の不適による河床変動量の相違、流量変化に伴う t_{sr} の変化などがあり、これらを考慮しておくことが必要である。図-8 で初期水位が異なるのは予備通水の影響である。（ $t_{sr} = 25$ のとき、30 分、 $t_{sr} = 40$ のとき 15 分間、現地量で $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量を通水した）。最上川実験の場合、 t_{sr} の影響は河床変動量に対しては大きい、水位に対してはそれほど大きくないことが判明した。

9. 検証

模型実験から得られるものは近似解である。実験目的や条件によって仮定がなされ、模型の有限性や物理量の範囲があり、精度のうえからみて各種の誤差を伴ったものである。したがって、模型の現象は現地

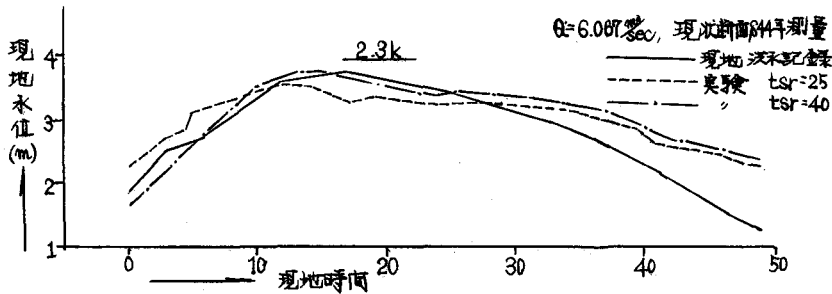


図-8 最上川河口部河道の水位一時間曲線

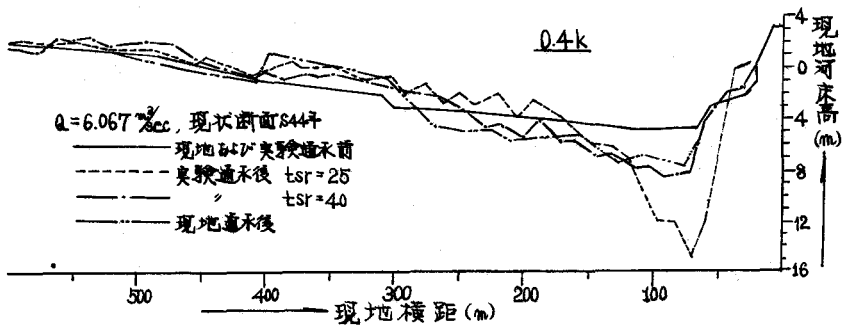


図-9 最上川河口部河道の出水前後河床変化

と等しくはない。検証は模型が正しいかどうかをみるために行なうのではなく、どの程度まで再現性を有しているかを調べるものである。たとえば、支配流量、時間縮尺、補給砂量、通水時間などの現地現象での位置づけや、再現される模型区間などを調べなければならない。また、有限の模型であるから補給砂量と下流端から、流出土砂量、および河床変動量の関係から土砂補給方法（計算値、上流において河床変動の起らない補給量、および十分な上流区間を設け補給を流れの条件にまかせる方法など）を選択する必要もある。さらに、歪の影響、砂れん河床の有効水深のとり方、均一粒径の影響の検討なども検証実験の目的に含まれるであろう。このような模型の検証には現地における各種の実測資料が不可欠である。一つの例を示そう。均一粒径の実験であると、深いところは深すぎ、浅いところは浅すぎる結果がでる。これは深掘れするわん曲の外側の河床材料は平均粒径 d_m より粗く、内側は d_m より細かいからであるが、通常はなかなか気付けない現象であろう。現地資料があって始めて模型上の再現性の程度が知れるのである。すなわち、現地資料が定性ならびに定量判断の基本である。

模型における現象の再現性を検証する方法と範囲は、実験の目的に応じて必要とされる現象と水量などの範囲により定まる。固定床実験では、通常出水時における水位、または粗度係数を合わせることで検証としてきた。これは必要最小の検証条件である。淀川河道の固定床実験（S・44）では出水時の航測結果に基づき、始めて表面流速分布の検証が行なわれた。移動床実験では、河床変動状況や洗掘深の比較が水位より重視される。出水時の航空写真によると、表面流速分布の他に、流況、水深の2倍の間隔で生ずる²⁰⁾といわれるタテ渦、浮遊砂濃度の定性的分布など、各種の興味深い現象が観察される。そこで、利根川佐原地区移動床実験（S・46）ではヘリコプターによる模型の航空撮影が行なわれ、現地航測結果と比較して良好な結果を得た。細かい粒径の河床材料が用いられる場合に発生する Ripple や Dune は流速分

布の不均性にに基づき、河道内に様に発達するものではなく、粗度や流砂量の分布、および乱流構造などに関係すると思われる。しかし、大局的にみて全体としての模型の流れを大きく変えるものではなく、ほとんどその影響を無視できる場合が多いことが判明した。小さな砂れんは交互砂礫堆の上のり、このような砂れんの上の流れにおいても、現地河川において観測されるようなタテジマが発生している。

その他の検証法として、流砂量分布を比較するものなども考えられるが、現地資料が十分でないことが多い。

10. 模型実験業務

実際に実験を実施することは、なかなか骨のおれることである。実験の計画、模型製作、施設の調整、²¹ 22 仕事のアレンジ、測定および実験結果の整理と現地適用性への解釈など本腰を入れないとできない、

²³ 屋外実験であると、天候（雨、風、湿度、張水）に対する準備から整形した移動河床を犬などの動物に荒らされないための注意対策なども仕事の主要部分に入る。このように、模型実験業務もシステムとして運営されるのである。このようなシステムにもいろいろ問題はあるがまず、このなかで計測関連事項が注目されるのであろう。理論解析研究が根底にあるとすれば、計測は計画の基本であり、かつ行政目的に近く、一層の興味が持たれて然るべきものといえよう。

計測項目としては、流量、水位、流速、流線、河床高、セン断力、波高、うち上げ高、越波量、同期、波向、掃流砂量、浮遊砂量、塩素イオン濃度、温度、表面流況（上方からの写真撮影も含む）などである。計測関係では精度、測定範囲、経費、必要とする人手とその技能、および時間などが問題となり、必ずしも全ての場合に自動化が望まれるわけではない。実験目的などからの総合的判断により計測内容も異ってくる。計測の自動化を促進するためには、計測器自体のほかに、大型室内実験場、空調、測定台車などの整備が同時に必要であり、近年注目すべき成果もみられる。²⁴ 25 自動測定に伴い、データ処理、電算および図化なども同時に開発が促進されており、近い将来実験が大変手軽に行なえるようになるものと期待される。

なお、移動床実験の場合、河床材料の搬入、および成形などに多くの人手を要す。河床材料の固結度や間隙率なども実験の精度に重要な関係を有するので研究が必要である。

11. 新しい種類の実験例

実際面からの要請と実験技術の進歩により、最近はいままであまり行なわれなかった種類の実験も行われるようになった。このなかには、河口、遊水池、蛇行、大型仮締切、波浪遡上、水質汚濁などの実験が含まれるのであろう。二、三の問題点のみ考察しておく。

河口模型実験は波と流れの異質の現象を一つの模型上に再現させるため、各種の困難な問題が存在する。^[7] 相似則としては、河口付近の土砂の堆積が重要であるので $(W_o/U)_r = 1$ の条件、波の変形から歪度 1 の条件（ただし歪模型も不可能ではない）、反射率同一の条件、模型縮率の下限の条件（Diephuis の実験によると、波形勾配が 0.02 のとき波の周期 0.7 秒以上、波形勾配が 0.08 になると周期 2 秒以上にしないと縮尺効果が入る。また、波長が 5 cm 程度になると表面張力の影響も入る）漂砂の運動機構が流砂のそれと異なることによる制約、（石炭粉については文献 ²⁷ 参照）、および密度流効果（実物の流口における河川流は表層において模型より流速が大きい）などがある。また、実験条件として潮位が河川流に大きな影響を及ぼすので潮位変動装置を考慮しなければならない。たとえば、洪水流による砂州のフラッシュ実験では、砂州を越流する場合には高潮位が、越流しない場合は低潮位のときの方がフラッシュ能力が大きい。この

他にも、いろいろの問題点があるが、最上川河口の模型実験では各種の検討を行ない良好な結果を得た。

遊水池実験では、遊水効果、および遊水池内の流況などが検討される。流れの三次元性が強いので、歪模型は好ましくないが、通常の縮率では越流水深が十分とれないことが多い。歪度5の一ノ関遊水池模型実験^[5]では、河道と遊水池内の流れの系を同時に考慮しうること、越流堤上に金鋼をとりつけ、鉛直方向に鋼目間隔を調節することにより、全ての水位条件で越流係数を同一にできることなどがわかった。なお、越流効果を算出する場合には下流端条件が $H \sim t$ ではなく、 $H - Q$ で与えられることが多く、計算時間が多くかかるので、境界条件が複雑な場合には、数値計算よりも模型実験の方が経済的なこともある。

この他、河道内の波浪遡上実験も歪模型で実施できる場合もあることがわかり、^{[8] [26]}これまで困難とされてきた蛇行の実験もこなすことができるようになっていく。

12. おわりに

実験によるシミュレーションは定性的な現象の把握にとって容易にして、かつ効果的である。最近では定量的判断材料にも用いられるようになった。また、条件が複雑な場合には数値計算よりも経済的なこともある。さらに、対象としている複雑な自然現象のほとんど全てについて観察することができ、現象の未知の性質をも発見できる。このことは、数学モデルの設定に重要な示唆を与えることにもなるであろう。

模型実験技術は着実な進歩をとげ、最近では模型実験に対する認識もひろく一般に深まりつつある。諸先輩の努力により、実際面における顕著な功績が深く根をはりつつあるからであろう。ここでは、模型実験技術の解説を通じて、最近の進歩の状況について述べてみたつもりであるが、つまるところ模型実験の進歩の記述は、実験要請の量的質的向上、基礎研究の発展、および資料の充実による検証精度の向上に終始するものであろう。今回、著者の能力不足により、最も重要と思われる実験結果適用後の現地現象に言及できなかったことが誠に残念であるが、ただ、模型実験が河川という総合した運動体系のなかで位置づけられ、基礎的研究と現地河川の水利とを結びつけた一つの生きたシステムを形成し、着実な発展の途上にあることを申し添えて結びとしたいと思う。

今後、現地観測資料の充実と基礎研究結果の活用により一層の発展が期待される。とくに、経費節減と時間短縮のための模型の小型化と歪模型の活用は促進されるであろうし、それに伴い、測定精度向上、測定自動化、資料の電算処理（作図を含む）などが必要で、大型室内実験も要求される。実験用河床材料の開発、材料の固結度、間隙率などの研究も必要である。また、海外河川の実験の増加も予想され、少ない資料の原始河川に対する実験法の検討が要請されるであろう。

【参考文献】

- 〔1〕 土屋昭彦：水理設計と模型実験，土木技術資料 12 - 5，S. 45
- 〔2〕 佐藤清一：水理模型実験の意義ならびにその相似律と相似限界について，土木試験所報告 60 号，S. 16
- 〔3〕 物部長穂・青木楠男・伊藤令二：北上川降開式転動堰模型実験，土木試験所報告 15 号，S. 5
- 〔4〕 須賀亮三：分合流の設計における水理実験の例，土木技術資料 12 - 5，S. 45
- 〔5〕 須賀亮三・浜谷武治：遊水池模型実験についての一考察，土木学会年講，S. 48
- 〔6〕 山口高志：河口部の設計に関する水理実験，土木技術資料 12 - 5，S. 45
- 〔7〕 須賀亮三・山本晃一：河口部水理模型実験の問題点，土木学会水講，S. 49
- 〔8〕 須賀亮三・佐久間襄・山田三郎：河道内波浪遡上模型実験の問題点，土木学会年講，S. 47
- 〔9〕 須賀亮三・山田三郎：河道内波浪遡上と水理実験，土木技術資料 13 - 12，S. 46

- [10] 須賀堯三：河川大型水理模型実験の現況と問題点，土木学会年講，S. 47
- [11] K. Suga : Some Notes on Hydraulic Model Tests of River Channels I. A. H. R. Symposium on River Mechanics , Jan. 1973 (S. 48)
- [12] E. W. Bijker , D. R. A. Stapel , M. devries : Some Scale-effects in Models with Bed-load-transportation , I. A. H. R 1957 (S. 32)
- [13] M. de Vries : Design and Operation of Movable-Bed River-Models I. A. H. R Seminar on Hydraulics of Alluvial Streams , Jan. 1973 (S. 48)
- [14] たとえば須賀・収添：水理模型実験用軽量河床材料について，土木技術資料7-5，S. 40
- [15] 岩佐義朗・高橋保：開水路非定常の相似律に関する問題点，京大防災研年報11号，S. 43
- [16] 須賀堯三・浜谷武治：河道水理模型実験における歪縮尺の影響，土木学会年講，S. 47
- [17] 須賀堯三・馬場洋二：河川湾曲部の歪模型実験の問題点について，土木学会年講，S. 46
- [18] 土屋・須賀・馬場・高橋：長良川河口堰水理模型実験報告書，土木研究所資料784号，S. 47
- [19] 須賀堯三・馬場洋二：わん曲部護岸の水理機能に関する二，三の実験的考察，土木学会年講，S. 46
- [20] 木下良作：航空写真による洪水時の流況測定，土木学会水工シリーズ，S. 43
- [21] 土木研究所河川研究室：河川模型実験の手引，S. 34
- [22] 山口高志：河川移動床模型実験とその問題点，土木技術資料9-9，S. 42
- [23] 山口高志：河川模型実験ア・ラ・カルト，土木技術資料10-6，S. 43
- [24] たとえば，福田・井原・早川：瀬戸内海大型水理模，土木学会，水講，S. 49
- [25] および 土屋・松山・馬場・小池・野口：水理模型実験の自動制御，土木学会，水講，S. 49
- [26] 須賀堯三・松村圭一：河道遡上波浪の推定法，土木技術資料16-6，S. 49
- [27] 田中則男・新保修：移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について，港湾技研所報12-1，1973 (S. 48)