

実在の河川の河床状況と模型の粗度との関係

東京工業大学 正員 椎 貝 博 美

1. 序 論

自然河川の模型実験を行なう場合、どのように粗度係数を定めるかということは重要な問題である。与えられた流量に対してマニングの n などが与えられている場合には、相似則を用いて n の模型に対する値を計算して使用するのが一般のやり方であろうと思われる。ファニングの f で河川の抵抗が与えられている場合には、粗さ k の推定が問題である。人工の粗度に対する k の値の推定法に関しては数多くの研究があるが、一般の自然河川の場合には k が物理的にはっきりしないものであるため、模型にひきなおすことができない。又、実物に対して何とか厳密解が成立する場合には、模型を作って、scale effect などを考察することはできようが、自然河川の場合には計算ができないからこそ模型実験をやるわけであるから、このような場合は極く少ないと思わなくてはならない。

自然河川といっても日本の場合には一応信頼できる種々の実測値もあり、模型実験も計算の裏づけの為として行なわれる場合が多く、問題点はかなりしぼられてくる。もちろん、新しい放水路を作ってその効果を予測するような場合には模型における n の値などが問題となる。しかし放水路の場合には n の推定も実物について何とか可能である場合も多いので、困難ではあるが解決できる問題であろうと考えられる。

しかし、世界の河川、特に開発途上国における河川は堤防のないような自然河川であって、資料も少なく、又流量測定などを行なおうと思っても簡単にできるものでもない。そうかといって、データがそろくまでは何もやらない、というのも一つの考え方であるとはいえるが、広く通用するものでもない。もちろんデータが全くなければ何もできないが、ある程度存在するときに技術者としてのどの位の予測が行なえるかということは面白い問題であると考えられる。現在は情報が多ければ多いほど正確な予測ができるということになっており、事実そうであって欲しいと思われるが、逆にいえば、最少の情報量で最大の効果をあげることも必要であろう。前述の原始的状況にある河川などはその場合である。

技術面から考えてみると自然河川においてはその現象を解明して行く手法に一般性はあるが、河川の性質自体にはそれぞれの特徴があって、一般的なことは定めづらいという点がある。例えば、流量、断面形、水面勾配を与えてマニングの n を求める手法自体は一般的であるが、 n の値を数多くの河川について一般的に定めようとする、あまりうまく行かないものである。もちろん、 n の値の範囲は判っているので、その意味では一般的なことはいえると考えられる。又、実験室内の水路内に存在する乱流も自然河川内には当然存在するので、その意味では一般的な記述も可能である。こう考えてみると、ひどく大きなスケール、あるいはかなり小さいスケールのことは何とか一般的な記述も可能である段階に達しているとも考えられる。しかし、一番大切な中規模のスケール (meso-scale) の現象はどうも一般的な定量化がしづらいようである。河川の模型実験はこの中規模の現象がからんでいる場合が多いようである。

2. マニングの粗度係数

河川の抵抗則は色々の実験公式（シエジイ，マニング等），あるいは理論式と実験とを巧妙に組み合わせたもの（例えば対数則の利用）があるが，わが国で広く用いられているのはマニングの公式である。一様な断面を有し，底勾配が一定な実験室内の水路ではファニングの f を通じて，（もちろん，粗さ k は適当にみつもらなくてはならないが） n を予測することができる。又このような場合には n は摩擦損失をあらわすことになる。しかし自然河川の場合に計算される n はどうい摩擦損失だけであるとは思われない。すなわち，計算上得られた n は流路の曲がり，局所的な巾の拡大，縮小，渦による損失，さらには突起による三次元的な形状抵抗による損失などが組み合わさったものである。従って，同じマニングの n といっても意味はかなり違うことになる。もちろん良く知られているように，損失を二つにわけて形状抵抗による損失，底質を形成する粒子と流体間の摩擦損失の二つについて別々に相似則を適用する方法もある。もし二つの抵抗が線型な，というよりは独立な現象であれば，この方法は巧妙なものであるが，それほど突っこんだ研究がされているわけでもなく，又，船舶の抵抗則などについては，この二つは独立ではないとされているので日本ではあまり用いられていないようである。これはもし筆者の思いちがいであればおゆるし願いたい。しかし，もし他に合理的な方法がなければ，この方法は一つの考え方ではないかと思われる。このとき n を用いるのが良いか，あるいは f を用いるのがよいかは議論の分れるところである。しかし，多くの場合，実用的には n が用いられているのが現状であって，その点からは n を用いなくてはならない場合が多いようである。しかし，いずれにせよ自然河川の場合の n ，さらに k はそれ自体で物理的な意味のあるものではなく，計算上あらわれてくるパラメーターであると考えるべきであろう。もちろんこの考え方は単純な場合について n ， k の物理的意味づけを行なおうとする試みを否定するものではない。

3. 二つの問題

次のような二つの問題を考えよう。

I スケールの大きな，資料の乏しい自然河川があって，これの模型を作った場合，その模型の信頼度はどうか。

II 前記の河川について，水理状況の変更，例えば堤防の建設とか，航路の掘削などが行なわれるとき，どのような予測方法が適切であるか。

実はこれは筆者が経験したことを抽象化したものであって，具体的にはメコン河とかチャオブラヤ河などを考えているのである。

現在では計算モデルを用いるという方法もちろん考えられる。これは信頼度さえあれば有効な方法であるに違いない。例えてみれば風洞実験なしに飛行機が計算できるようになればよいわけである。これは現在から将来にかけての問題であると考えられる。なお，E C A F E ではメコン

河デルタ部の数学的モデルを作成するのに200万ドル以上の費用をかけ、なお、信頼性に問題があることを附記しておく。

筆者の提案する解決法は次のようなものである（固定床の場合）

i) まず比較的縮尺の小さい（従って広い領域の）ひずみ模型を作り、多少でも資料があれば、これをできるだけ忠実に再現するように粗度を合わせる。

ii) 次に、問題の箇所をできるだけ縮尺の大きい、又ひずみの小さい模型を作る。ひずみを小さくすれば、特に粗度をつける必要はない。

iii) この二種の模型を比較する。もし模型についての実則値にあまり差がなければ、抵抗は表面摩擦よりも形状抵抗が多いと考えるべきであろう。このような場合にはことさら第二の模型の表面をなめらかにする必要はない。このような状態では模型の信頼性はかなり高いと考えられる。なお局所的に層流状態が生じてても特にその数に全体の n などが変化するとは考えられない。

iv) 二つの模型の結果を元にして更に掘削等の影響を調べることができる。もし何の人為的な粗度を掘削された断面について用いないとすれば、最初の模型では水深が小さく、あとの模型では大きくなる傾向があるはずである。従って工学的な判断の材料にはもちろん用いることができる。又、これら模型についての状況を再現するような数理模型を作ることによって詳細な予測を合理的に行なうことができる。

v) もしも二つの模型の間に大きな差違が生ずるとすれば、模型による予測の信頼性は低いと判断すべきである。従ってもっと資料の獲得をはかるようにすべきである。あるいは何か画期的な理論を考えてもよいかもしれない。

4. 模型縮尺の選定

前節でのべたことを合理的に行なうため、次のような方法を試みた。まず、マンニングの式 (1) がとにかく成立するとして

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

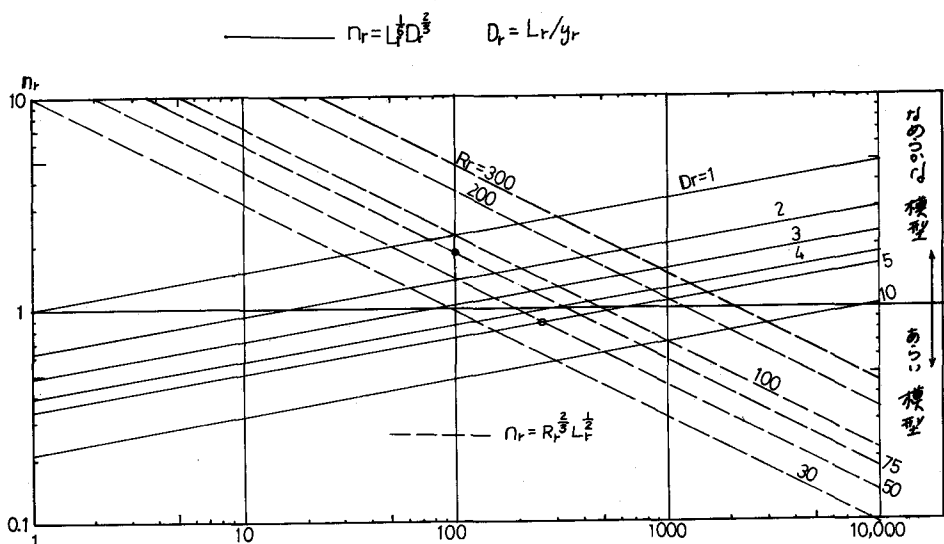
とする。ここに V : 平均流速, R : 動水半径, I : 底勾配とする。（エネルギー勾配とはしない）。水平方向の尺度を L , 鉛直方向の尺度を y とし、実物の値を模型の値でわったもの、すなわち、よく用いる X_p/X_m を X_r とかくことにすれば、フルード相似が成立するとして、

$$Nr = Rr^{\frac{2}{3}} Lr^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

であり、特に巾の広い水路の場合には

$$Nr = Dr^{-\frac{2}{3}} Lr^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

がえられる。ここに $Dr = Lr/yr$ であってひずみ比 (distorsion ratio) とする。(2)および(3)式を Rr, Dr をパラメーターとして図示すると図1のようになる。図1を用いれば、どの範囲のスケールで模型の方を滑らかにしなければならぬかが容易にわかる。



四 1 模型縮尺と n の関係。

この方法を用いた例としては、メコン河の例がある。河床の形状は超音防測深機で得られたものを修正したもので図 2 に示す通りである。図 2 の点線で囲った部分に航路の通れる水路があり、この水路をどのように広げれば安全に船が通れるようになるかという問題である。この問題に対する解答は文献 1 にあげてあるので省略するが、模型としては小さい縮尺を $L_r=250$ 、 $D_r=5$ とし、大きい縮尺を $L_r=100$ 、 $D_r=1.25$ にえらんだ。このようにえらぶと、図 1 に示すように一方は smooth model（模型の方をよりなめらかにする）、他方は rough model となる。rough model の方の粗度を調整するためには小石を用いたが、底の変化に対してかなり多くの小石を用いてはならなかった。従って表面の摩擦抵抗よりはむしろ形状抵抗がほとんどとなるような模型となった。この模型を用いて航路内部を流下する流量を求め、これによって第 2 の模型を作成し、実験を行なった。第 2 の模型は模型の方をよりなめらかにしなくてはならないが、特にモルタル仕上げをていねいには行なわなかった。このような状態でも、二つの模型の水深は図 3 にみられるようになりかなりよく一致した。このことは、抵抗がほとんど形状抵抗となっていることを示唆するものであろう。

掘削後の状態については当然のことながら、両者は一致しない。これは掘削後の水路内の n が予測できないので、第 1 のモデルでは水深が低くでているためである。この点からすれば第 2 のモデルがほぼ真の値に近いのではないかと考えられる。第二のモデルでは掘削後、水路内部をできるだけなめらかに仕上げれば、誤差はせいぜい、表面摩擦の差のオーダーであると考えられる。重要なことはこの程度の河床状況でも抵抗はほとんど形状抵抗になるらしいということである。メコン河の場合には特に複雑なみおすじができているので、一般的な点はやや薄れるかも知れないが、興味ある事実である。近來、小石の代りに銅板を多数埋めこんでおき、これを折りまげるなどして粗度を

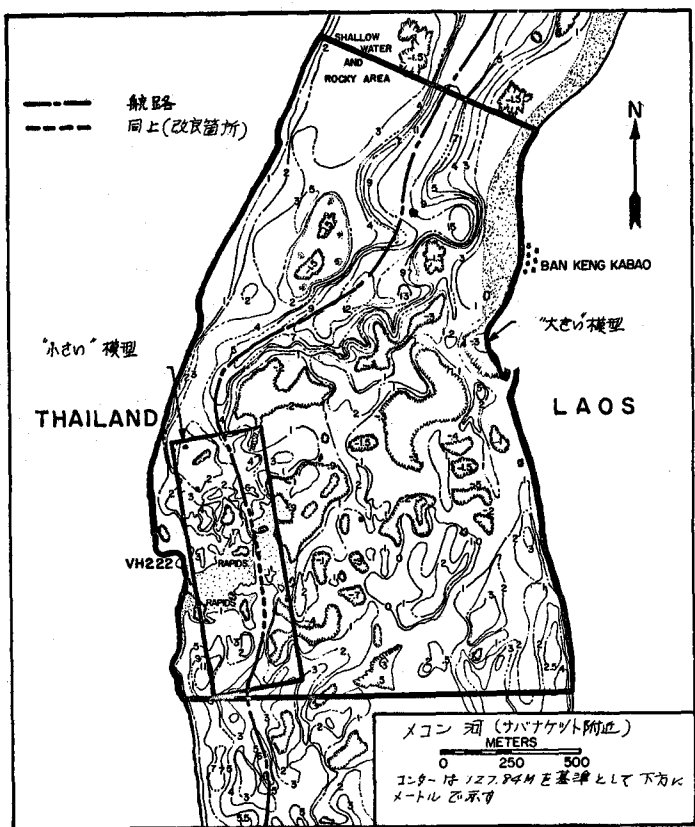


図2 - メコン河 河床形状

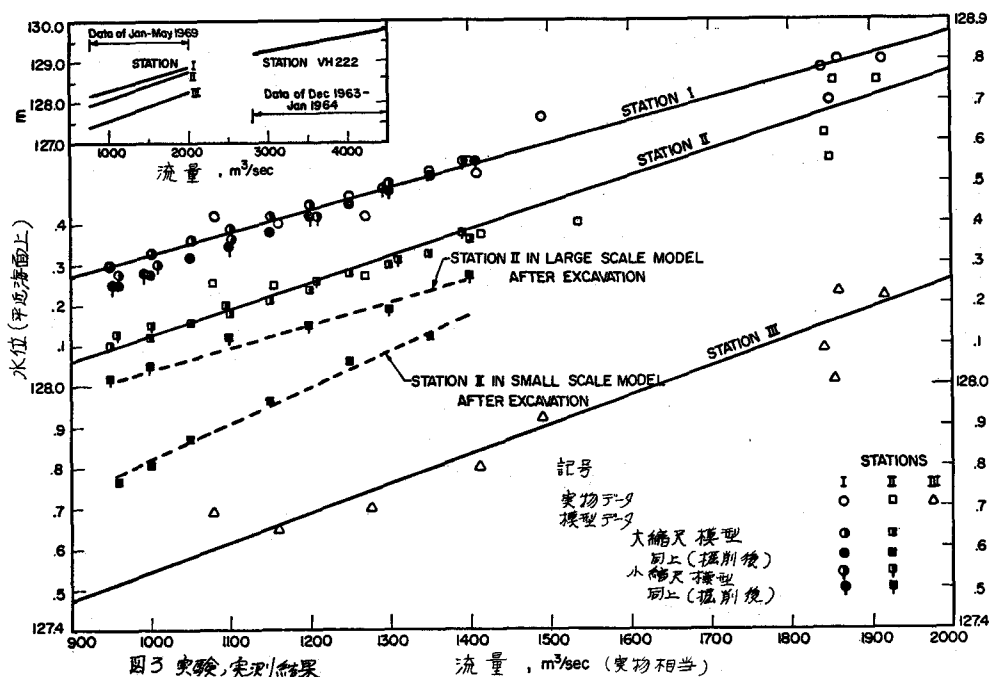


図3 実験、実測結果

あらわしている例を多くみるが、これも抵抗を主として形状抵抗、あるいは断面の減少などで代用しているとみられ、もしこのような方法で現実に支障がないものならば、少なくとも表面粗度は形状抵抗で代用できるということになる。

5. 結 語

i) 二種類の模型を用いて河川流況の変化の予測を行なうことを提案した。二種類の模型とは、ひずみ比の少ない、smooth model とひずみ比の大きい rough model である。

ii) この方法をメコン河の予測に応用した所、ほぼ妥当と思われる結果をえた。

iii) 予想以上に自然河川では形状抵抗の方が表面摩擦より大きく、その意味で smooth model の利用を見直してよい。

6. その他

この研究は筆者が AIT にいた時に ECAFE のメコン委員会の委託により行った研究より派生したものであり、AIT に深い謝意を表する。又、共同して模型実験にあたった Dr Ackermann, Dr. Subin, Dr. Anat に深く感謝する。

又、本実験を元にして、東工大吉川教授の考えにより、メコン河の河道内の流れのシミュレーションを数値的に行ない満足すべき結果をえたことを附記する。

7. 参考文献（相似率については多くあるので、ここには直接関係するもののみ示す）

i Navigation channel improvement on the Mekong River at keng Kabao, N, L, Ackermann, A, Anat, P. Subin and H. Shi-igai, AIT Res. Rep. № 15, Jan, 1971.

ii Feasibility study on blasting in the Mekong River 1, G.E.C. Woolatt, Mekong Committee, July, 1967.

iii 同上 2, May. 1968.

iv 同上 3, June. 1969.