

第 7 章

移動する境界に伴う水面形

セクション I

はじめに

7-1. 固定床と移動床の計算の相似点と相違点

図 7-1 および図 7-2 に示されるように、移動床上の流れに関する水面形の計算は固定床の水面形状の計算とは異なります。両方の計算において、調査区間が特定されてモデルが作成されたときに境界が引かれます。それらのモデルの範囲内で、調査対象地域のデジタルモデルを作るために、地域の形状および損失係数がとりまとめられます。この時点において物理的に連想できるのは空の開水路です。

a. 固定床の解 固定床上の定常な漸変流の不等流を解く基本的な式（第 6 章を参照）から分かるように、解を求めるには、通常、流量および水面高の 2 つの数値を必要とします。モデルに流入する流量および下流の水位は、数学的な用語で「境界条件」と呼ばれます。物理的に連想できるのは、水を開水路に入れるためにバルブを開けて、その流れが望ましい深度で開水路から排出されるように下流側のゲートを調整することです。図 7-1 におけるボックスは、計算のシーケンスを示している矢印とともに、典型的な水理パラメータ、流速、深さ、幅、勾配を示すことによって、解を導くプロセスを表しています。

b. 移動床の解 移動床では、固定床に加えて、数値モデルに含まれなければならないプロセスの数が増えます。水柱と河床表面の間における流送土砂の交換速度を定める流送土砂の連続の式に加え、流送土砂、河床の粗度、河床の被覆、河床表面の厚さ、河床材料の分級、河床材料の間隙率、河床の絞り具合に関する式が必要となります。これらの要因の増加は、複雑さを増す大きな原因となります。しかし、それは固定床と移動床と間の数値計算における最大の違いではありません。最も大きな違いは、横断面の形と河床の n 値が流れの関数になるということです。従って、図 7-2 において矢印で図示されるようにフィードバックループが形成されます。 n 値についての不確実性は、移動床の問題に関する数値的なモデリングをかなり難しくします。

その他にも重要な問題があります。

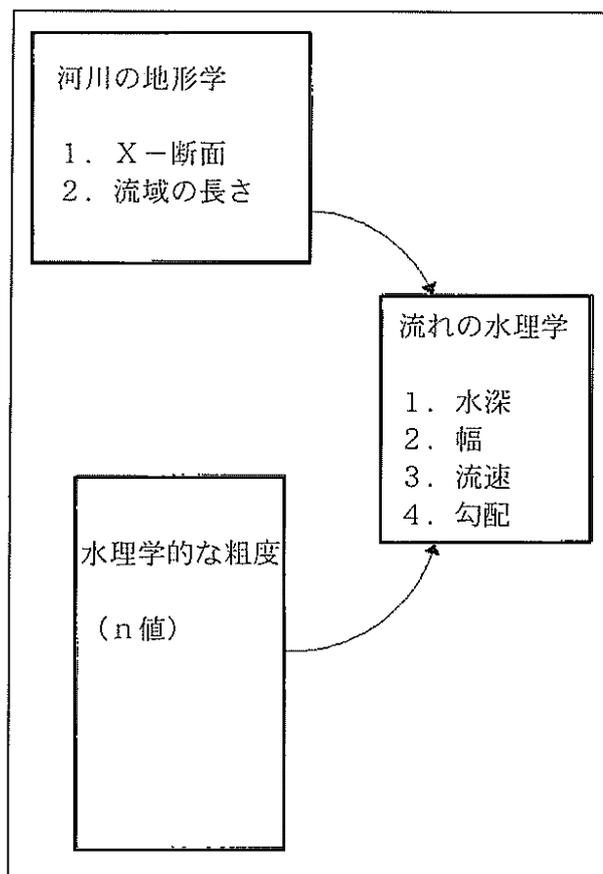


図 7-1 固定床模型

例えば、様々なサイズの流送土砂が混ざって流される場合に生じる河床の分級プロセスが十分に理解されていないなどです。また、流送土砂は主に水路の中で流れるため、移動床に関する計算では、各々の横断面における、左右岸の高水敷において、流れの正確な分布を把握しなければならず、また、流れがどのようにその横断面の位置に到達したかの履歴も把握しなければなりません。水面高を解くための固定床の計算においては、エネルギーのバランスをとることだけが必要です。

セクション II

理論的な根拠

7-2. 流砂量関数

1942 年以前、流送土砂に関する調査・研究の多くは、DuBoys (1879) による影響を受けました。彼は、河床の剪断応力の考え方を提案し、河床材料が河床の層の中で動くプロセスを視覚化しました。

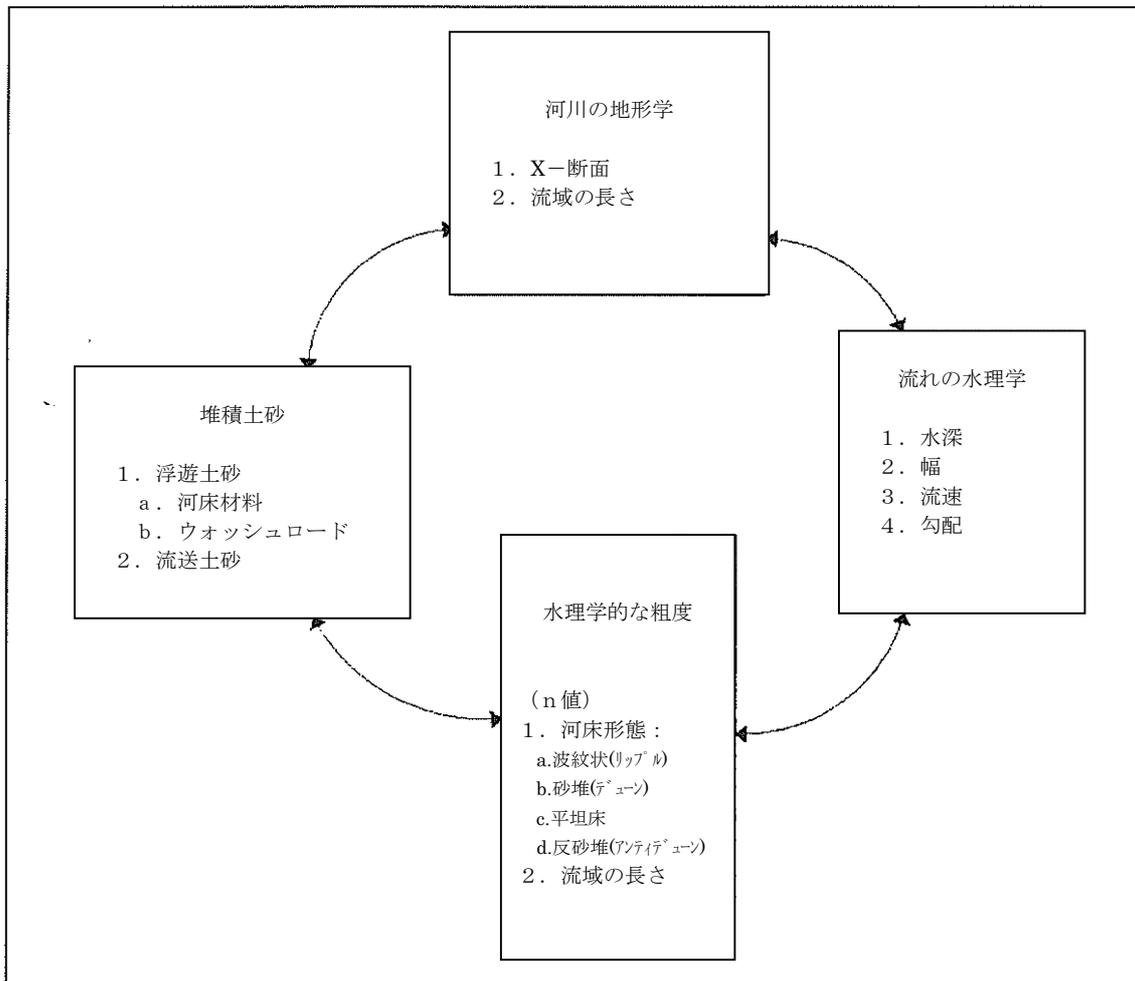


図 7-2 移動床模型

動きの限界深度は、流速がゼロになるところとしたものでした。流送土砂に関する DuBoys の計算式は ASCE(1975) に記載されています。流送土砂の予測に対するアプローチの大きな変化は、Einstein (1942) によってもたらされました。Einstein は、砂の粒子が、流送土砂の粒径と比例した平均のステップ長でステップ状に動くとして仮定した確率概念に基づく移動計算式を示しました。「Einstein の流送土砂関数 Einstein (1950)」の中で、それらの概念が具体化されています。

a. Einstein の概念 Einstein は、次のように河床材料の移動を説明しました。

流送土砂の動きに関する最も単純なケースは、河床が均質な土砂だけの場合に生じます。

ここでは、移動は全面的に流速によって定義されます。河床が混合物から構成されている場合は常に、移動は、流速および材料の構成によって示されなければならず、あるいは流送土砂のサイズに対する移動曲線の全体によって示されなければなりません。長年、この事は軽視され、移動する材料構成が河床のそれと同一であるという仮定がなされてきました。この仮定は、全ての河床の混合物がひとまとまり（ユニットで）動く事例の観測に基づいたものでした。河床におけるより広い範囲の粒子径では、特に、河床を構成する物質の一部が浮遊状態に入るようなサイズである場合には、この仮定は維持できなくなります。この種の移動のいくつかの例は、ASCE (1975) の 42～44 ページで述べる開水路実験に掲載されています。

輸送物質の粒度分析は、これらの実験において、基本的に河床の粒度分析とは異なります。粒度分析のこの違いは、単に、河床の粒子の動きは、流れと粒子自身の移動能力だけに依存し、他のいかなる粒子の動きにも依存しないということを示す計算式によって表されます。(Einstein 1950、32 ページ)

(1) 河床の粒子の運動が流れと粒子自身の移動能力だけに依存し、他のいかなる粒子の動きにも依存しないという Einstein の仮定は、堆積と侵食の2つの独立したプロセスとして、数学的に河床材料の移動に関する平衡状態を説明することを可能にしました。彼は「平衡状態」を提案し、それを「時間と河床の各々の単位に対して、粒子が河床から洗掘されるのに伴い、それと同じ種類およびサイズの粒子が河床に堆積する。」場合に存在する状態として定義しました。(Einstein 1950、32 ページ)

(2) Einstein の業績は古典的で標準的なもので、平衡土砂流送のプロセスに関して完全な見方を示すものですが、それは、計算の数値的な複雑さのため、一部分、応用に役立ってきたというよりも、それらのプロセスを理解することに役立ってきました。その他の多くの研究者が流送土砂関数について貢献してきました。それらの研究者は現地調査で得られた様々なデータと比較した場合に信頼できる関数を作成するため、常に研究を行ってきました。結果として得られた関数は非常に多いのですが、どの関数も、全ての状況に対して他の関数より優れているというわけではありません。したがって、以下の関数を、各種のパラメータの重要性を示すために、ここに示します。

$$\bar{G} = f(U, d, S_e, B, D_{eff}, SG_s, G_{sf}, D_{si}, P_i, SG_f, T) \quad (7-1)$$

(流送土砂)

ここで

- B = 流れの有効な幅
- d = 流れの有効水深
- D_{eff} = 混合粒径土砂の有効な粒径
- D_{si} = 各々のサイズ等級 i における粒子直径の形状平均
- G = 重量/時間の単位での河床材料の総流送量 (例えば、トン/日)
- G_{sf} = 粒子の形状係数
- P_i = 河床にある粒子の i 番目のサイズ等級の割合
- S_e = エネルギー線の勾配
- SG_f = 流体の比重
- SG_s = 流送土砂粒子の比重
- T = 水温
- U = 流速

特に重要な項は次のとおりです。水理パラメータ (U, d, S_e, B)、流送土砂の粒子に関するパラメータ (D_{eff}, SG_s, G_{sf})、流送土砂の混合パラメータ (D_{si}, P_i)、流体特性 (SG_f, T)。

b. 流砂量関数の選択 上記のように、河床材料の移動速度およびサイズの分布状態を計算する目的で、多くの輸送関数が作成され、河床材料の分類 (ASCE 1975) が示されました。特定の状況での関数の使用に関して、どの関数が「最善」であるか明示できないため、技術者は関数が導き出された方法、関数の作成者がどの種類のデータを比較してきたか (河川における観測と、実験室における開水路)、および過去の使用履歴というようなことに精通しなければなりません。最近の調査 (Yang と Wan 1991) は、実験室データと現地データの双方と比較した複数の移動関数の正確さを格付けし、河川データに関する精度は、精度の良い順に (後になるほど精度が落ちる) Yang, Toffaleti, Einstein, Ackers と White, Colby, Laursen, Engelund, Hansen であると結論付けました。また、その調査において、この格付けは、どの特定の計算式に関しても、全ての流れおよび流送土砂の状況下で他より優れていることを保証するものではないと述べています。別の調査 (Gomez と Church 1989) では、レキ河床 (gravel bed) の河川に関して、Einstein, Parker, Ackers-White の計算式を支持しています。河川の特性に基づく「適用性指数」が Williams と Julien (1989) によって作成されています。WES-SAM (USAEWES 1991) パッケージは、選択作業を支援する手順を提供しています。このパッケージは、特定の水流の移動速度や水理特性の比較結果や計算結果という、過去の調査から得られた情報を使用した各種の移動関数のスクリーニングに基づいたものです。そのようなアプローチの利用方法は、アメリカ陸軍工兵科 (1990e) によって文書化されています。技術者は、異なる移動関数は異なる結果を導く可能性が高いということを認識していなければなりません。河川形状の計算結果に関する影響よりも移動速度に関する影響の方が、おそらく大きいであろうと考えられます。極端な状況 (例えば、泥土および浮遊物の流れ) においては異なる解析技術を必要とします、例についてはアメリカ陸軍工兵隊 (1990f) を参照してください。

c. 移動境界問題の数値モデル化 移動境界問題の数値モデルにおいて、土砂量の計算式が存在しているものの、土砂量の計算式と移動境界モデルの計算式の間には大きな違いがあります。表 7-1 にそれらの違いをまとめます。この表で、「平衡」および「非平衡」状態という用語は、流れと河床の間での流送土砂の粒子の交換を指します。河床が、流送土砂計算式に対する唯一の流送土砂の供給源である場合、土砂移動モデルでは、河床および区間へ流入する流送土砂の双方がその区間における計算の流送土砂の供給源となるように、河川を区間で区切らなければなりません。

表 7-1

移動床の堆砂モデルに対する流送土砂の移動

A. 流送土砂の流量計算式	B. 流送土砂の運動モデル
A1. 流れ強度、河床粗度、粒子の比重、河床の表面の粒度分布を必要とする	B1. A1 の全てに加え、流入する流送砂量、長距離にわたる河川形状、基礎岩盤位置、河床表面下の粒度分布。
A2. 平衡状態を計算する	B2. A2 の全てに加え、非平衡輸送による河床縦断面の変化の計算。
A3. 河床材料の関数	B3. 河床のレキの上を進む砂の場合、モデルは、それを受けることを要求される移動および河床表面の粒度分布を求める。ウオッシュ・ロード ¹⁾ は、複数の方法において取り扱われる可能性がある。

土砂の動きは速度および粒径分布によって大幅に変化する傾向があるので、非平衡状態は 1 つの区間から次の区間までとするのが一般的です。移動床の堆砂の数値モデルは、サイズ等級による移動を計算しなければならず、河床内およびその表面に関して、粒径の変化の連続的計算しなければなりません。

(1) 一般適用性 (general applicability) を持つよう、数値的な堆積モデルは、非平衡の場合に関して、侵食された流送土砂の粒子混合物を、移送し、堆積させ、安定させなければなりません。Einstein は非平衡の状態を考慮しませんでした、しかし、セクション 7-12 で述べるように、彼の「粒子交換」構想は HEC-6 の数値的な土砂移動モデルに関して拡張されています。

(2) 大部分の工学的調査に関して、土砂移動モデリングは、個々の粒子の運動をたどることを必要としません。むしろ、このモデリングは、粒径や物性を対象とした河床の粒子挙動に対する流れ強度の影響の計算を必要とします。目標は非平衡の流送土砂の状況に応じて河床の表面高さの変化を計算し、それらの変化を流れ強度一流送土砂パラメータの水理計算へフィードバックすることです。流送土砂の質を扱ういくつかの問題は、流送土砂の粒子の経路および粒子の分級を追跡することなしに十分に扱うことはできません。

セクション III

データ要件

7-3. データ要件の概要

2 種類のデータが必要です。1 つは、実現象の挙動の記録です。もう 1 つは、数値的なモデルを操作するために必要となるデータです。最初の実現象における挙動の記録は、計算による再現のために使用されます。次の、河川形状から始まる数値モデルを操作するために必要となるデータは、更に詳細に示される必要があります。データを必要とする領域を詳細に定義するために、プロジェクトの対象地域および調査区域の境界がプロジェクト・マップに示されていなければなりません。調査対象地域および支川の横方向の境界を示し、プロジェクト対象地域における過去の調査から得られた河床の形態は、モデルで再現しなければならない過去の形態を把握するために非常に有益です。プロジェクト対象地域の航空写真およびそのモザイクは、流域における水路幅、蛇行長、堤防線の動き、土地利用の過去の傾向、を識別するのに非常に役立ちます。水位記録には、プロジェクト対象地域への一年間の水の流入情報ならびに同地域からの流出情報が含まれています。また、それらは、調査区間およびその周辺の水深、流速、 n 値および水位-流量曲線における傾向に関する水理パラメータを確立することに役立ちます。実測値を調査することが重要です。実測値として水位-流量曲線の「推定された」部分を考慮してはなりません。この例を図 7-3 に示します。ここでは、計画流量が 16,000 立方フィート毎秒の区間において 1,850 立方フィート毎秒より少ない流量が観測されています。

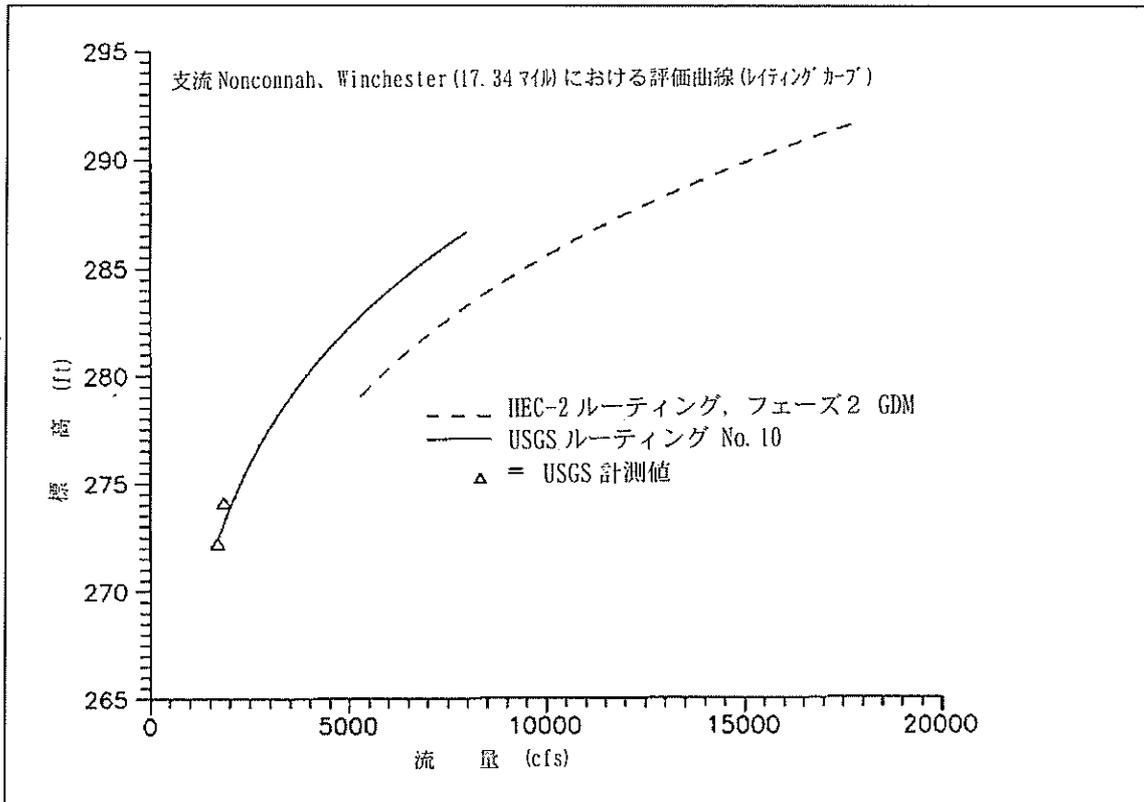


図 7-3 観測地点における水位—流量曲線

セクション 5-8 および 6-10 に記述されているとおり、その「観測された」データは、誤差の対象であることを認識してください。プロジェクト区間の予備調査は、流路の形態や幾何学的な特異性、構造物の存在、水路の流送土砂の特性を決定するための貴重な資料となります。可能ならば、地盤工学および環境の専門家を現地予備調査のメンバーに加える必要があります。これらの実現象の観測結果をプロジェクト報告書に記録します。実現象を橋との交差部のみならず、できるだけ広い範囲で観察する必要があります。観測された水位・流速・調査区間における洪水のような水理データは、非常に有益です。現地の機関や新聞や居住者は、現地観測データを補うことができる有益な情報源です。

7-4. 形状データ

移動床の計算は水面および河床の表面の高さを、それらが時間とともに変化するものとして、算出するものです。この計算は最初の河川形状を定めるのに必要です。その後、この計算は、移動床の理論に応じて横断面を埋積あるいは侵食します。

横断面の位置を変更してはいけません。

a. 横断面

(1) 固定床における計算の場合のように、横断面が水路の収縮および拡大をモデル化するような横断面を見いだすことは重要です。また、輸送能の限界を認識し設定することは、特に移動境界のモデル化において重要です。実現象において、流れが横断面図の横方向の一定の範囲まで広がらない場合、輸送能の限界をモデルに設定しなければなりません。

(2) 横断面の間隔に関しては、確立された最大間隔は存在せず、その間隔は、調査の必要性、および使用されている数値モデルに関連した精度の要件の双方から決定されます。ある調査では、川幅と同じくらい短い距離を必要としました。また、他の調査では、10~20 マイル離れた間隔の横断面を使用して成功しています。重要なことは、過去からの河床の縦断的な形状の変化を把握し、水面高および境界を再現できるデータを作成することです。

普通のアプローチは、固定床の計算に関して作成されたものと同じ河川形状から始めることになります。大部分の固定床のデータは、洪水の流れを解析する準備ができており、それらは、橋梁のような構造物の方へ偏る可能性があり、長期の河川挙動にとって重要な区間における標準的な断面が不足しているということに留意する必要があります。また、モデルの精度を保つために、これらの横断面の一部をデータから削除されなければならない場合があります。

例えば、形状による乱れが発生し一次元の流送土砂で表現できない深い曲がり部分または合流部における場合です。しかし、それらは通常例外です。

b. 河川距離標 将来の参考のため、図 7-4 に、地図上における横断面の位置を示します。横断面図の識別番号としての河川距離標の利用を推奨します。横断面は任意のセクション番号よりも河川距離標によって参照される方が、古いデータを使用する場合や修正する場合より便利です。

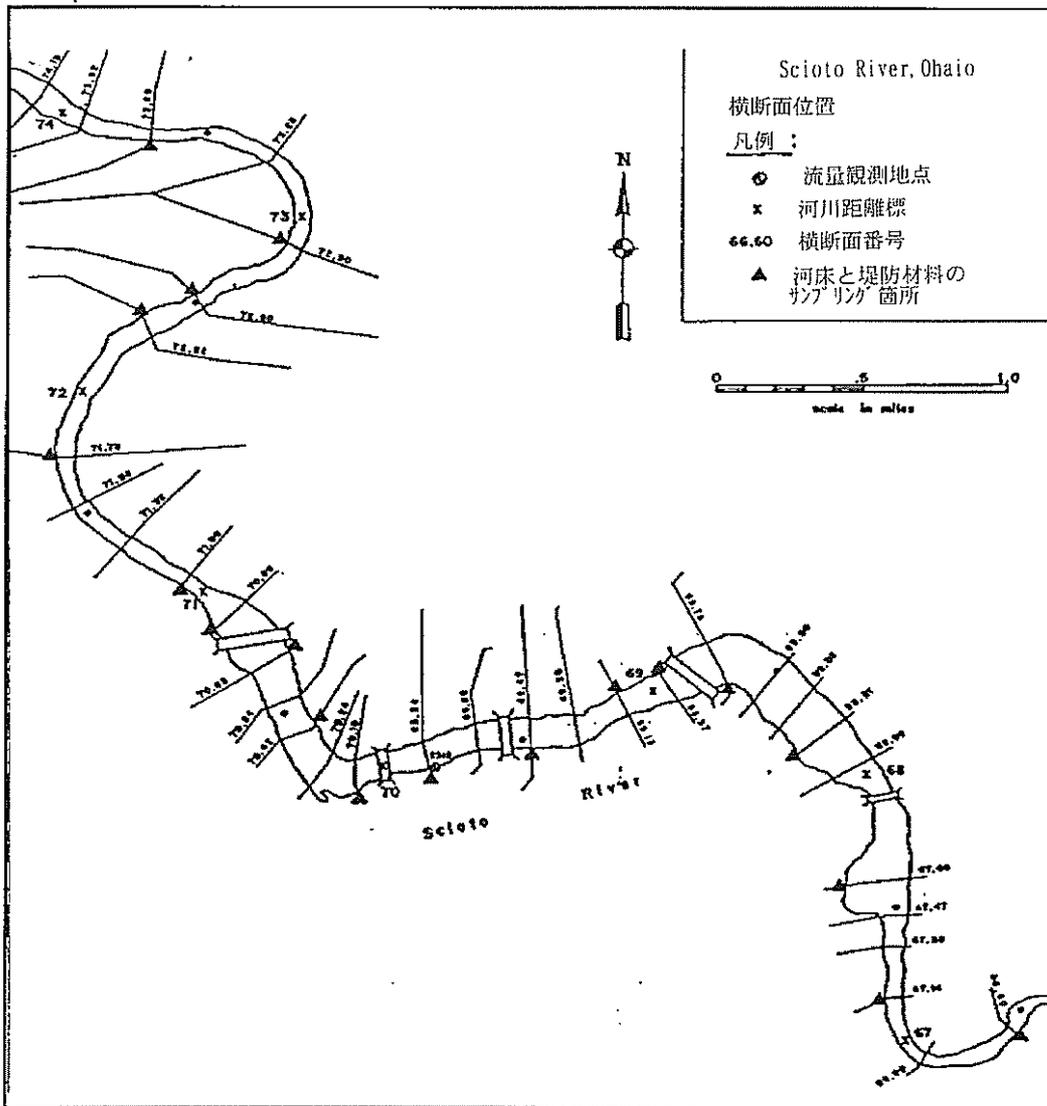


図 7-4 横断面図位置

7-5. 河床土砂データ

河床物質が溜まる場所は、そこから流送土砂が発生する可能性があり、またはその上に流送土砂が堆積する可能性があります。この河床物質が溜まる場所は、水路の全ての幅を占めます。そして、場合によっては高水敷にも広がります。しかし、それは岩の河床の場合には、深度は浅いものとなります。

a. 河床物質が溜まる場所の分類 また、河床物質が溜まる場所では、流送土砂の分級が行われます。

b. 状況データ 「境界条件」に関するセクション(7-6)では、流入する土砂の吐出量を計算するための位置を選ぶための考え方を示します。このセクションでは、侵食に耐える被覆層の成長についても説明しています。

(1) 例えば、1つの調査では、支川の20マイルの区間にわたって27の横断面が配置され、各々の横断面における河岸において2つのサンプルが採取されました。サンプルの1つは、水際近くから、もう1つは、水際と堤防の中央付近の砂州から採取されました。これらのサンプルで粒度試験が行われ、その結果を図7-5および図7-6に示しています。

(2) 水際のサンプルから得られた結果は、水際と堤防の中央付近の砂州のサンプルより粗かったため、このサンプルは侵食の試験に使用されました。水際と堤防の中央付近のサンプルは、移動速度の試験に使用されました。

7-6. 境界条件データ

この区分に含まれる4種類のデータは、流入する水の流量、流入する流送土砂の濃度、流入する流送土砂のサイズ、流出境界の水位です。

a. 水の流入 瞬間的な流量（例えば洪水のピーク）は、重要かもしれませんが、移動床の解析には不十分です。なぜならば、時間が支配的な変数であり、運動の瞬間的な速度よりもむしろ水路の変化を引き起こす流送土砂の量が問題となるからです。従って、流量ハイドログラフが作成されなければなりません。この段階では測定結果の慎重な操作を必要とします。あるいは、流出ハイドログラフの計算を必要とする場合があります。過去の観測データは現状までの河川の挙動を再現するのに必要であり、この結果から将来を予測し、河床の縦断面を決定します。

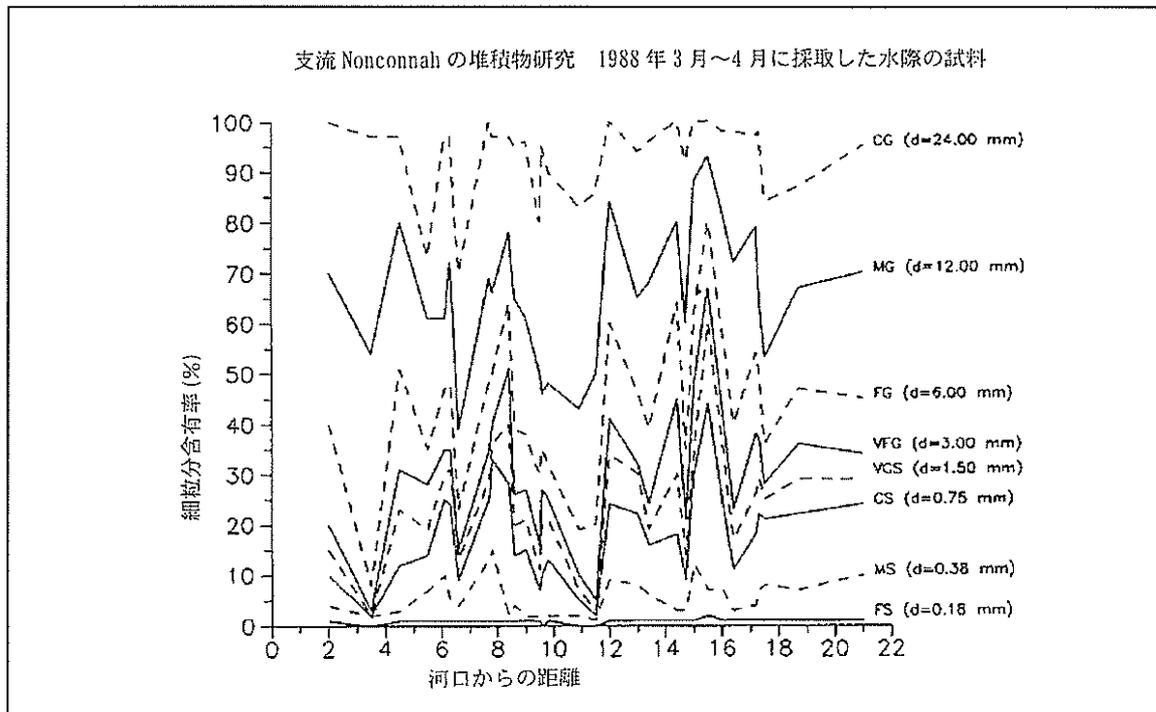


図 7-5 水際のサンプルに基づく河床表面の分類

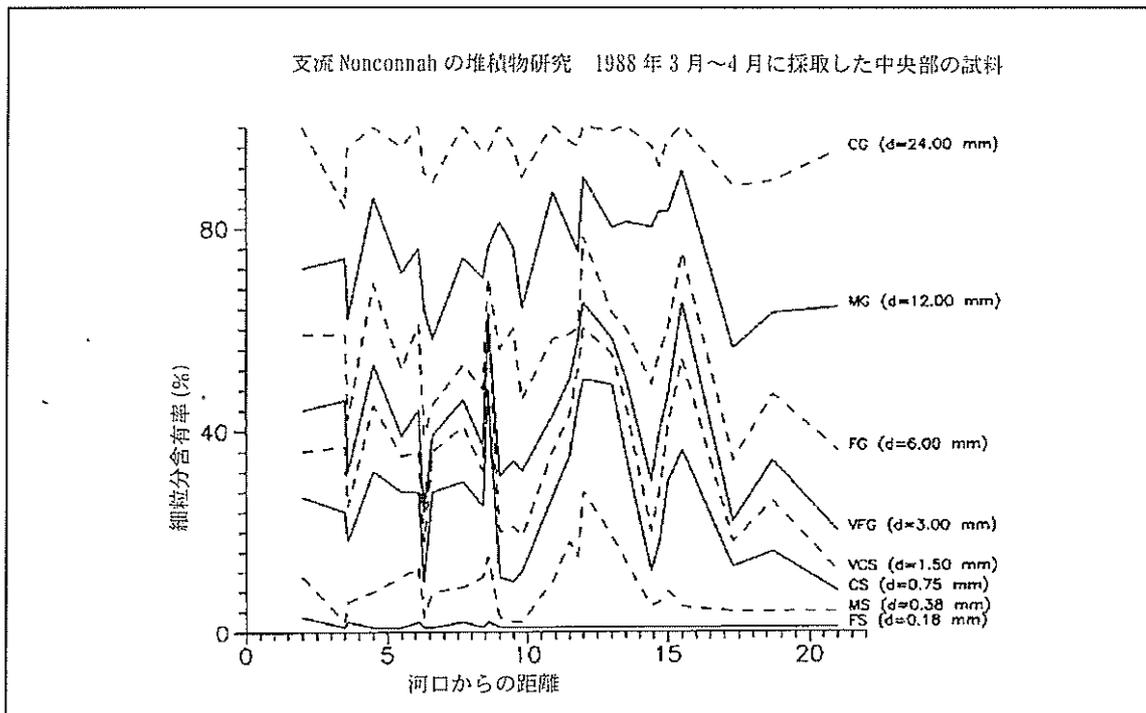


図 7-6 砂州中央のサンプルに基づく河床表面の分類

(1) ハイドログラフの期間の長さは重要です。1 年につき 10 分の 1 フィートの河床における高さの変化でも 50 年または 100 年単位のプロジェクティブの間では、重要になります。長期のハイドログラフは計算の手間の増加になる可能性があります。場合によってはデータの圧縮技術が役に立つかもしれません。例として、図 7-7 に、1 年間にわたる毎日の平均の流れが、より長期間の流量を導き出す方法を示します。

(2) 支川は、横方向の流入の境界条件です。それらは、水および流送土砂の分布状態を明確にするため、場所が特定され、識別され、必要に応じてグループ化されなければなりません。位置は、縦断面図の上で示す必要があります。調査区間内、水位観測のある領域およびない領域からの水の流入および流送土砂の流入が含まれることが重要です。調査期間中の水収支は、考慮されなければなりません。流量の 10 パーセントの増加は、河床材料の輸送容量の 20 パーセントの増加になる可能性があることを心に留めておいてください。水位観測地点のない領域からの流入は、新たに考慮する必要があります。場合によっては、集水面積の比率が使用できるかもしれませんが、その他にも、集水域の水文モデルの利用または作成が必要となるかもしれません。個々の水路としての解析に含まれなかった支川に関して、どのようにして流入量を確定したかを記録に残すことも重要です。

b. 流送土砂の流入 第 2 および第 3 の境界条件は、流入する土砂の堆積、およびその堆積における各々の粒径等級における粒子のサイズです。

(1) 流入する流送土砂の堆積 過去の浮遊流送土砂の観測結果（リットルにつきミリグラムとして表される）が入手可能です。これらは、水の流量に対して通常プロットされ、多くの場合、流送土砂の流量とはほとんど相関関係を示さないのですが、流入する流送土砂のデータを推測する場合には、そのようなグラフを利用することになります。解析が進むに伴い、堆積物をトン/日の土砂量に変換し、図 7-8 に示すような水の流出量の関数としてそれを表すことは大部分の状況において行われます。1 つの記録周期に関して 1 つの分布範囲が、グラフ上にあらわれるのが一般的です。水の流量が両方の軸の上でプロットされているので、堆積物のプロット点上の分布範囲は小さくなります。分布の範囲は、季節の影響（例えば植物の状況や高さ）、ランダムな観測誤差、流域の変化、あるいは、観測期間の間の水文状況、またはその他の原因により生じると考えられます。解析担当者は、慎重にこれらのデータを調べなければならず、その関連に関する形態および分布範囲を理解しようとしなければなりません。

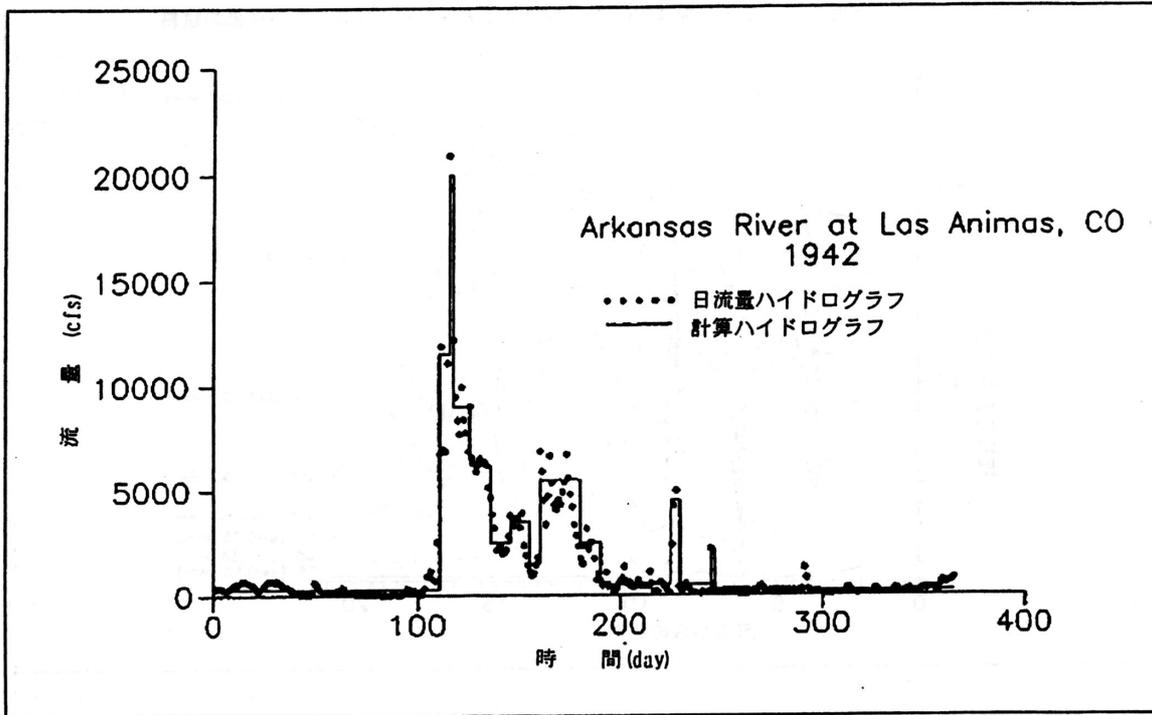


図 7-7 水の流量ヒストグラフ

(2) 砂の粒子サイズ等級 移動床の計算を行うための総土砂量についてはサイズ分級を行う必要があります。表 7-2 に、Idaho 州の Lewiston における Cleawater 川に関して作成された手順を示します。図 7-9 は、そのデータのグラフです。河床における各種の粒子サイズ、および与えられた流れに関する浮遊土砂の分類において、必ずしも粒径の増加によって移動速度が減少するというわけではないことに注意してください。この現象は主に低水時に生じます。したがって、全体的な水流の挙動に対してはあまり重要でないかもしれません。

(3) 移動理論による流送土砂の流入量の計算 浮遊流送土砂の観測結果が入手可能でない場合、流入する流送土砂の境界条件を決定しなければなりません。その計算は、移動床の水理学および流送土砂の移送理論が適用できる土砂に対して可能です。ウォッシュ・ロードの流入に関しては類似の理論はありません。境界条件に関する計算を行う場合、非常に慎重に水路の区間を選ぶ必要があります。それは、勾配、流速、幅、水深といった水理学的な事項が土砂の移動に関して、プロジェクトにアプローチできるものでなければなりません。また、それは、流れによって移送された土砂で平衡状態にある河床表面を有していなければなりません。

そのような区間を設定し、水路断面においていくつかの河床表面のサンプルをとります。採取箇所は横断面図の低水路より、むしろ微高地または砂州となります。そして採取箇所の位置を記録します。図面上で、流れの範囲全体にわたる、分布を把握します。

(4) 河床材料の試料採取 図 7-10 に、砂州上での典型的な河床の流送土砂の分類パターンを図示します。流送土砂計算のため、どこで河床の分類を得るための標本を取るべきかを決めるために、図 7-10 に示されているような情報を使用します。標準的な粒径が砂州の表面上で粗から細へのパターンを形成するのが観察できたとしても、実際の河川における堆積過程の全てを示すような、常に正確な分布状態を捕らえる箇所は 1 箇所も存在しないことに注意してください。河床の分類は土砂量の計算結果を左右します。たとえば、粒径が減少すると移動速度は指数的に増加します (図 7-11)。サンプリングの位置を決定するための単純な規則はありません。原則は、「常に代表的なサンプルを捜すこと」です。すなわち、非常に慎重に、採取位置を選び、土砂量の計算結果あるいは侵食に対する河床安定度の計算結果が偏るような特異性を避けるということです。橋梁のような構造物の近くで取得されるサンプルは、区間の移送特性を代表するデータになることは、まずありません。

Runsey 上流の支流 Cache (カリフォルニア) 堆積物の総量の測定値と流量

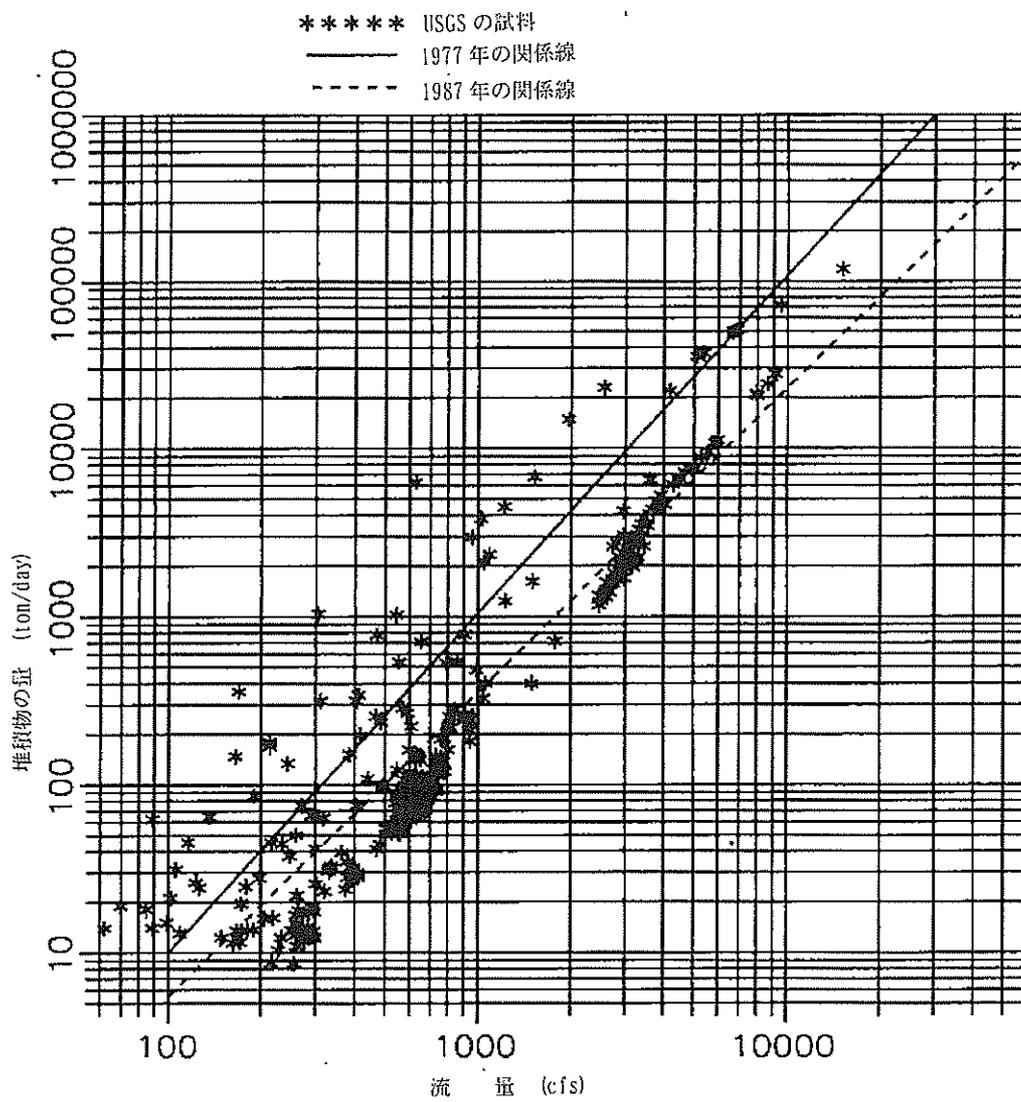


図 7-8 土砂量の水位-流量曲線

表 7-2

砂の粒子サイズ等級による流送土砂の分布状態

水の流量：35,000 立方フィート毎秒

粒径 直径 mm	分類	流送土砂の率		流送土砂量		浮遊土砂の率		浮遊土砂量		総重
		%	トン/日	%	トン/日	%	トン/日	(4)+(6)	トン/日	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	流送土砂量、トン/日...130 総浮遊土砂量 (Total Susp.)荷重、トン/日...1,500 総流送土砂...1,630			
<0.0625	シルトと粘土	0.04	0.05	54	810	810				
0.0625-0.125	VFS	0.10	0.13	10	150	150				
0.125-0.250	FS	2.75	4.00	13	195	199				
0.250-0.500	MS	16.15	21.00	19	285	306				
0.500-1	CS	13.28	17.00	4	60	77				
1-2	VCS	1.19	2.00			2				
2-4	VFS	1.00	1.00			1				
4-8	FG	1.41	2.00			2				
8-16	MG	2.34	3.00			3				
16-32	CG	6.33	8.00			8				
32-64	VCG	23.38	30.00			30				
>64	玉石以上	32.03	42.00			42				
合計		100.0	130.18	100.0	1,500	1,630				

注：

1. 流送土砂のサイズの分布状態は、通常、河床材料分類の流送関数およびフィールドサンプルを使用して計算されます。流送土砂量は、まず観測されることはなく、計算により求めなければならないかもしれません。
2. 浮遊土砂量およびその分類は、フィールド観測から得ることができます。

(5) 支川からの流送土砂の流入量 支川殻の流送土砂の流入は、本川からの流入に比べて、通常、データが少ないために、より確認するのが難しくなります。解決策は、現場の予備調査の間に、各々の支川を評価することです。たとえば、支川の流入口で三角洲を探します。支川に沿って水路の河床洗掘または堆積を探します。支川を安定させるための落差工またはその他の構造物を探します。支川にコンクリートライニングがあるかどうかなどのかくれた要因を探します。これらの観測は支川の土砂量を求めるときに役に立ちます。

c. 放水路の水の高さ 最後の境界条件は、調査区間の下流端部での水面の高さを特定します。それが物理モデルのテールゲートと同じ役割を果たすので、水理工作物の下流側の水面高さなる場合と水位-流量曲線となる場合があります (図 7-3)。また、水位ハイドログラフとなる場合もあります。境界の摩擦が支配的な要因となる区間、つまり、水面勾配がほぼ一定である区間では、水位-流量曲線から等流水深を計算することができます。

支川や貯留池での流入口でせき上げのような背水状態が存在する場合、境界条件として水位ハイドログラフを使用します。そして流入ハイドログラフと同じ期間設定されていることを確認してください。

d. 境界条件は、時間とともに変化します。上記の説明は、流入する流送土砂曲線およびそれらの粒径の分布状態が、水路の水位-流量曲線と同様に将来変化しないと仮定したものです。その仮定は、各々のプロジェクト向けに較正されなければならないか、調査手順および数値モデルの応用に対して適切な修正が行わなければならないかもしれません。

7-7. データの入手先

a. 全般 調査のために必要とされるデータは、オフィスのファイル、他の連邦機関、州あるいは現地の機関、大学、コンサルタント、プロジェクト現場および調査区間の現地予備調査を行っているチーム、研究のために特に始められた調査、から得ることができると考えられます。

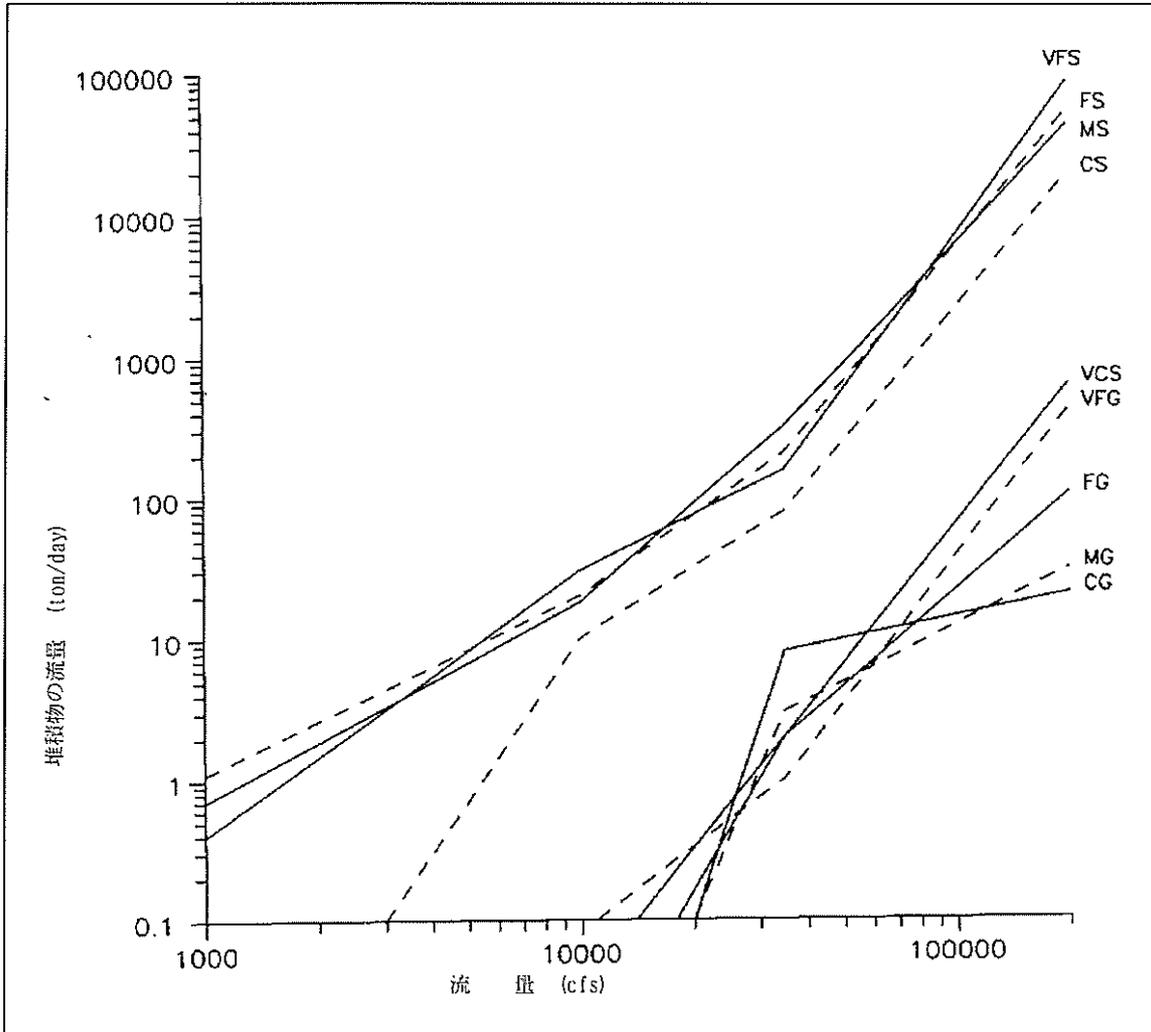


図 7-9 流送土砂曲線

b. 米国地質調査所 (USGS) 米国地質調査所 (USGS) の地形図と毎日の平均流量のデータは、水理学ならびに水文学の調査で通常使用されるものであり、流送土砂の調査に関しても一般的なデータとなります。しかし、多くの場合、毎日の平均の流量データは流送土砂の調査には適切ではありません。特定のストリップチャートが入手できれば日平均の流量よりも詳細なデータを得ることができます。流況 (流量-期間) の表は、内部 (インハウス) で作成するより、むしろ米国地質調査所のものを使用することが好ましいかもしれません。流況表は USGS の州オフィスから入手できます。水質データは、時には浮遊流送土砂の集積状態および粒径の分布状態を含みます。

USGS のデータには通年および一定期間、毎日の最大および最小の土砂量のデータがあり、河床材料に関する粒径の分類の周期的な観測結果として、利用できます。

c. 米国気象局 (NWS) 日平均の流出量が、降雨データの記録から直接計算され、詳細な水文ルーチンのない地域でも流況曲線として表現される場合があります。これは、米国気象局によって毎月発表される各々の州の降雨データを使用しています。観測所にもよりますが、1時間ごとの雨量データがすぐにアクセスできます。より短い間隔の降雨データが North Carolina 州 Asheville の NWS 国家気象局から得られる可能性があります。

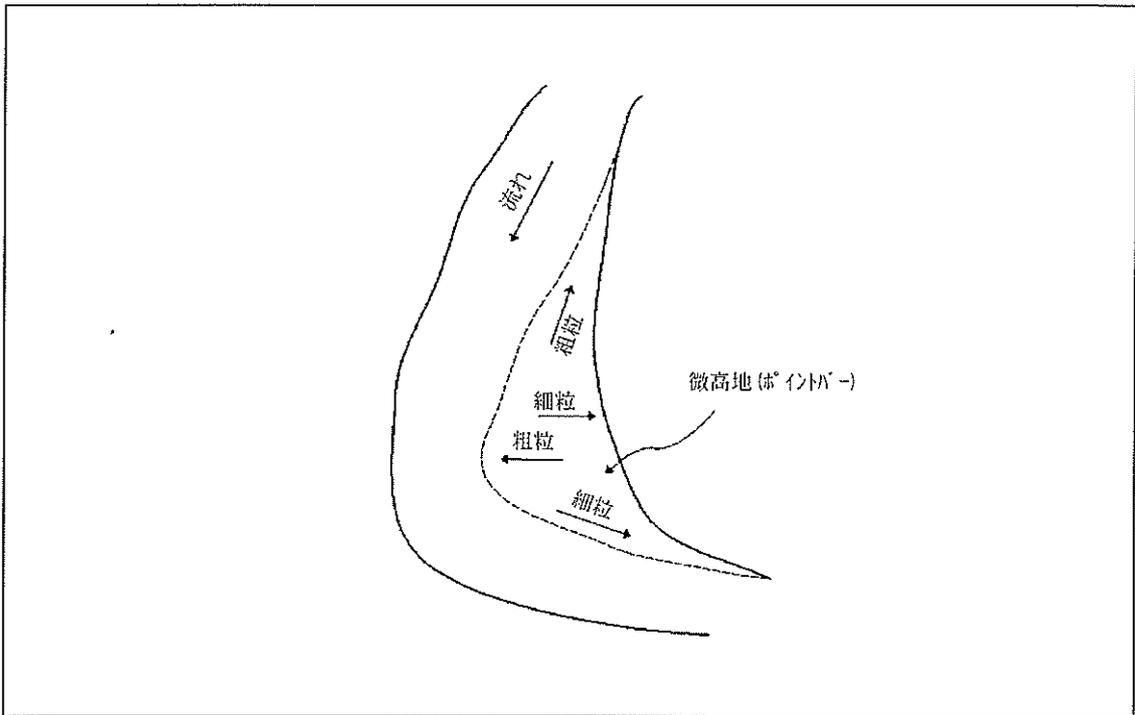


図 7-10 砂州の分類パターン

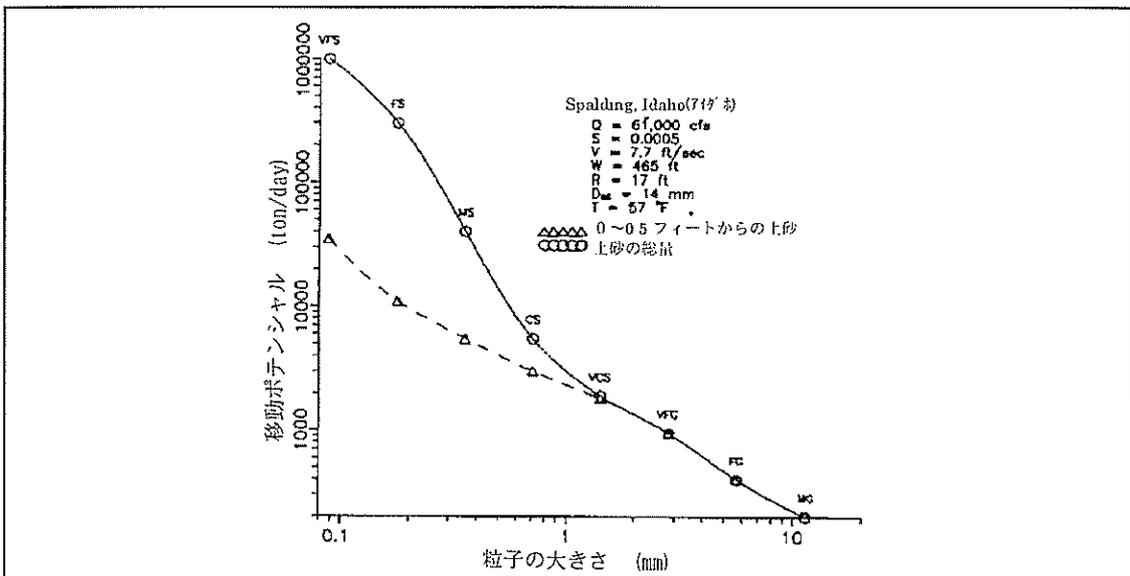


図 7-11 粒径による流送土砂の変動

d. 土壌保全局 (SCS) 現地 SCS 事務所には、過去の土地利用の情報、将来の土地利用の推定があり、土地表面侵食と流出土砂量に関する良い参照先です。この事務所は、土壌マップや地被物マップ、そして流出土砂量の推定を支援するために使用される可能性がある航空写真を保有しています。一般の土壌流出の式へ入力するデータは、アメリカ合衆国の大部分に関して入手できます。また、SCS は 5 年ごとに、全米に存在する何百もの貯水池に関する堆砂報告を更新し、そして、流送土砂の観測結果のデータに関する有益なデータを提供します。

e. 農業安定保全局 (ASCS) この農務省の機関は、作物耕地の航空写真を保有しています。耕地上空の飛行が定期的に行われるので、それらの写真にはそれらの耕地を流れる水路も写っており、過去の水路の挙動を確認するために非常に有益です。

f. 工兵隊 工兵隊が既存のプロジェクトの活動および建設の予備調査のために、流量のデータを集めているので特定の調査区域に関してかなりのデータがすでに存在しています。工兵隊は、氾濫平野の情報の調査に関連して、かなりの観測結果、空中および地盤写真、水路横断面を取得しています。工兵隊の研究所は、デジタルモデルの開発を支援するための専門知識および方法も所有しています。

g. 州機関 多くの州に、気候学的・水文学的な流送土砂のデータ収集計画 (プログラム) があります。多くの場合、地形データ、集水面積、水路長、勾配、地被物、土砂移動について、経時的なデータが入手できます。

h. 現地の機関、大学、コンサルタント、企業、居住者通常、現地の機関から、土地利用計画データを得ることができます。また、多くの場合、横断面図および地形マッピング・データを入手できます。現地の機関および現地の居住者は、時間の経過とともに領域の変化に関する口頭および写真の情報をもっており、それらの情報は技術者にとって最も有益です。この情報源は、大きい洪水、堤防の空洞化、大きな土地利用の変更およびその時期、水路浚渫の記録、および他の情報に関連した水路の変化の情報を含んでいます。同様に、新聞およびその河川を暮らしに利用する個人からも有益なデータが得られます。

7-8. データと水面形の精度

算出された水面高と観測された水面高の ± 0.5 フィートの誤差は、自然河川の移動境界の調査としては満足いくものです。計算された平均の河床高は実現象と密な相関関係を示さないかもしれませんが、横断面積の変化を実現象の挙動に適合させなければなりません。

セクション IV モデル確認と利用

7-9. モデルの性能

プロジェクトの解析のために数値モデルを使用する前に、モデルの性能を確認する必要があります。理想的には、これは分割記録試験 (split record test)、すなわち、係数の選択 (または較正) および係数の確認、から成ります。係数の選択段階では、計算結果が許容できる誤差範囲内で現地観測を再現するように、係数の数値が選択・調整されることを目的としています。計算された結果は、データ不足または物理的に非現実的な係数を識別するために、実現象からの観測結果と比較されなければなりません。係数は、その後、観察結果の値と計算結果の間の一致性を改善するために、一定の範囲内で、必要に応じて調整されなければなりません。モデルの調整は、十分に考慮できなかった要因を実現象の観測結果に無理に適合させるために、物理的に非現実的な係数を利用するというものではありません。モデルの結果と実現象のデータの間不一致が残る場合、支配的となる物理的な事項に何かの間違ひがあるか (推測の結果として生じる事項の不足)、あるいは、モデルへの入力値としての現地調査で得られたデータに不足があるか (応用誤差)、実測値に何かの間違ひがあるか (データ不足) のいずれかです。モデルの較正が、係数の物理的に現実的な数値の利用を通して達成されない場合、観測された実現象のデータは、起こり得る誤差に関してチェックされなければならず、数値モデル (入力データ、基本式およびその解のアルゴリズム) を調べなければなりません。

a. モデルの調整 モデルの調整は、シミュレーション結果が実現象の挙動と許容範囲で一致する状態となるようなシミュレーション結果をもたらすデータ修正のプロセスです。調整は、固定床および移動床の係数の選択、ならびに三次元的な実現象の観測を「代表する」一次元のデータに変える技術の応用から成ります。

固定床の係数は、移動境界の特性、収縮および拡大の係数および無効な通水断面の図形に依存しないマンギングの n 値です。移動床の係数は移動床に関する n 値です。そして、それは流送土砂の速度に依存すると考えられます。一次元の計算のための代表データの生成は、単にサンプルの集合体を平均することによってでは得られません。河川に対して、水理パラメータの一次元の近似をもたらす横断面の選択です。ここで、この水理パラメータは、モデルにおける水および流送土砂の運動が、実現象において模倣されるように実現象の数値を再現するものです。流送土砂に関して、それは、河床材料の分類、流入する土砂、支配的な実現象のプロセスを反映するような流送土砂の負荷で分類された各々のサイズ等級における流送土砂となります。

(1) マンギングの n 値 洪水流に関して n 値を決定する最も信用できる方法は、過去の洪水において観測された高水位を再現することです。別の方法は、観測された水位記録を再現することです。信頼できる現地観測結果がない場合の方策は、横断面図 (Brownlie 1981, Limerinos 1970) の移動床部位に関する移動境界の粗度の推測、および高水敷と固定床部に関する写真 (Barnes 1967, Chow 1959) の利用です。現地の予備調査の間、実現象を撮影した写真を記録としてまとめます。

(2) 収縮および拡大損失 収縮および拡大損失に関する研究は、 n 値に関するものよりも少ない状況にあります。King と Brater (1963) は、鋭い湾曲のある部分における急な変化に関して 0.5 および 1.0 の数値を与え、最も簡単に移動が発生する部分に関して 0.05 および 0.10 の数値を与え、0.1 および 0.2 の設計値が提案されています。King と Brater (1963) は、Hinds (1928) をそれらの参考として引用しています。アメリカ陸軍工兵隊 (1990b) によって引用される数値は、多くの場合、段階的な移行部分に関して、収縮および拡大のそれぞれについて 0.1 および 0.3 です。

(3) 代表データ 三次元の開水路流に関して一次元的な表現を作成することは技術を要します。その作成には、三次元的な流れを視覚化し、そのイメージを一次元の記述に表すことを必要とします。このステップは、多くの場合、許容できる表現に達するためには何回かの繰り返しが必要となります。このアプローチは、固定床シミュレーションを最初に実行することによって解に近づき、それから流送土砂を加える方法です。

b. 最初の試験

(1) 定常流、固定床試験 河岸高さとなる危険水位 (bank-full) について、定常状態の流量から始めます。

安定状態にある水路で、これは約 2 年周期の洪水ピーク流量となることを想定しています。モデルは水面高を再構成するだけでなく、流速、水深、幅、勾配を調べることによって、許容できる水理的な結果を得ることを確かめます。この試験は、多くの場合、流体の拡大率、したがって必要とされる輸送能の限界より大きい横断面間の幅の増加を明らかにします。非常に深い湾曲部の流速の計算結果は、場合によっては湾曲の近辺の流送状況を代表にすることにはなりません。

この事に関して、1 つの解決策は、モデルからそれらのセクションを削除することです。

このときの流量から得られる結果は、既存の水路を「通常、定常状態にある」水路に近づける方法に関して、いくつかの洞察を提供します。すなわち、高水敷上の流れがある場合、それが実現象で本当に生じることを検証し、そして、定常状態にある水路において危険水位流量は、約 2 年周期の洪水ピークであると考えられますので「数値的な問題」ではありません。移動床の試験に移る前に、プロジェクト形成において使用される最大の流量に関して、この定常状態である固定床の試験を繰り返すことは重要です。観測すべき重要なパラメータは、水面高さ、水路と高水敷上の流れの分布、流速です。各々の調査はユニークですが、調査者は、このパラグラフの内容が、解析プロセスを図示することであって完全なチェックリストではないことに注意しなければなりません。

(2) 定常流、移動床の試験 移動床で 2 年周期の洪水ピークに関するモデル性能を評価することは重要です。水路が安定状態近くにある場合にはごくわずかな河床上昇または河床低下にしかなりません。しかし、流送土砂の堆積が始まる前に、水路のマンギングの n 値が移動境界に関して適切なことを証明する必要があります。横断面図の河床に関する n 値が、河床粗度の推測から得られるものと妥当なレベルで一致することを確認する必要があります。また、通常、河床層が形成されるに伴い、ここから洗い出される細粒分が河床サンプルに豊富に存在しているため、流送土砂の移動速度は、シミュレーションの初めの方が後の方より速くなります。物理的な類推としては、水が新しく造られた流路を流れ始めることとなります。流入する河床材料のサイズを、輸送能および河床の分類と整合させることが重要です。実測値での移送は、通常、平滑化を可能にするために十分に大きいのですが、採用された曲線はその移送の範囲内で残らなければなりません。

c. 不正確な n 値の結果 固定床の水理学で、 n 値は範囲として選ばれます。その範囲の下端は捨石工 (riprap) の流速を設計するのに用いられ、高端は洪水防御用の水面高の決定に用いられます。

移動床調査においては、流送土砂と粗度の間にフィードバック・リンクがあるため、そのようなアプローチは通常満足のいくようなものではありません。そのリンクに適合しないマンニングの n 値の使用は、過大な河床低下または河床上昇となる可能性があります。

d. 確認プロセス モデル調整プロセスは、モデルが実現象で観察された事項を再現することを確実なものとする事です。2 番目のステップである確認プロセスは、境界条件を変更し、係数を変更することなくモデル化を再び行うことです。このステップは、最初のステップにおいて選択された係数が、モデル作成に使用されていない洪水に適用した場合、その係数が同様に実現象の挙動を再現しているかどうかを確認します。流入する流送土砂量を、確認の設定された時間において実現象と一致するよう、必要に応じて変更します。定常状態データから始めて流れのハイドログラフへ進みます。

(1) 意思決定において使用されるそれらのプロセスで、モデル性能の評価の基礎を形成することは重要です。これらは、通常、水面高、水路と高水敷における流れの分布状態、流速、横断面における変化、各々の横断面図を通過する土砂量、各々の横断面図を通過するサイズ等級による蓄積された土砂量が含まれます。

谷線の挙動が三次元プロセスであるので、一次元のモデルは正確に谷線の高さを再現しないかもしれません。したがって、確認試験で谷線の高さよりむしろ断面端部領域の変化または他の観測を使用します。確認結果を示すために 3 種類のグラフをプロットしなければなりません。1 番目のグラフは「水位-流量」です。図 7-12 に例として、算出された水位と観察された水位-流量曲線の比較を示します。2 番目のグラフは、図 7-13 における、水面高および河床表面高さによって図示されるように、特定の時間における「高さ-距離」です。3 番目のグラフは、図 7-14 に示す調査区間に沿って選ばれた横断面の「高さ-時間」です。

(2) 使用される確認期間は数年であるかもしれません。そうであれば、プロットに対して、1 年あたり数個の重要な数値だけを選びます。調査対象地域内の全ての水位観測地点において算出された水面の高さを、観察結果とともに、プロットします。モデル性能は、誤差の絶対値の平均を計算することによって数量化されます。もちろん誤差の平均値以下であれば、よりよい性能ということになります。

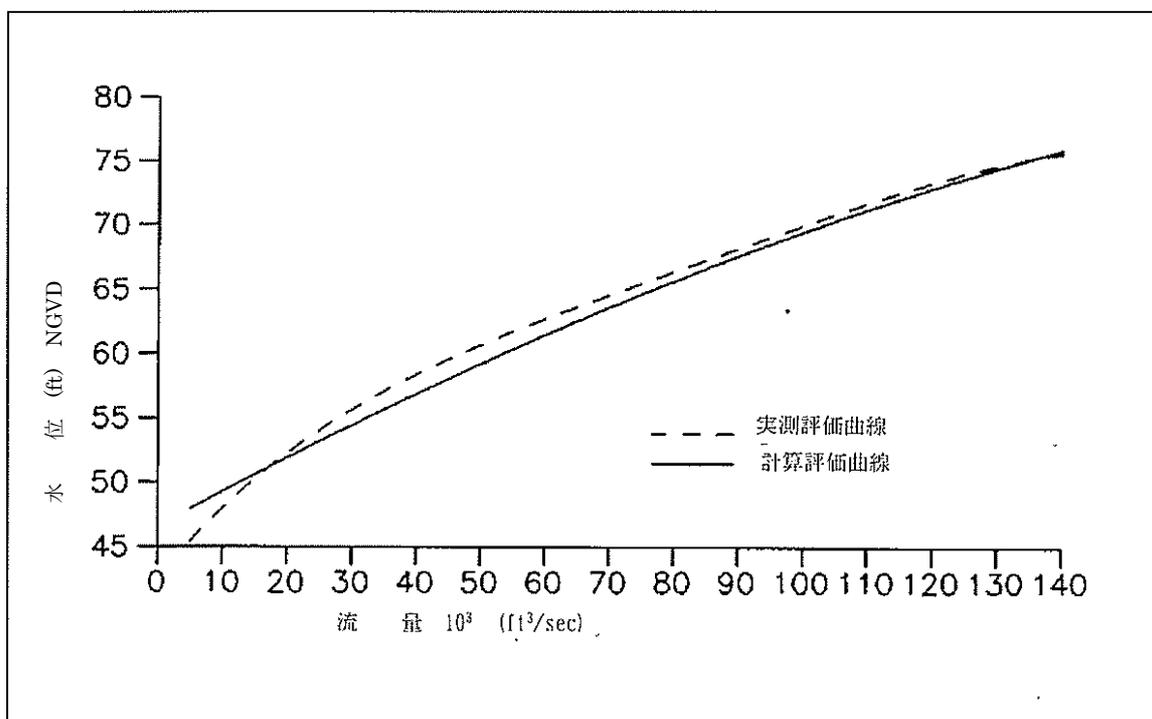


図 7-12 水位-流量曲線の再構成

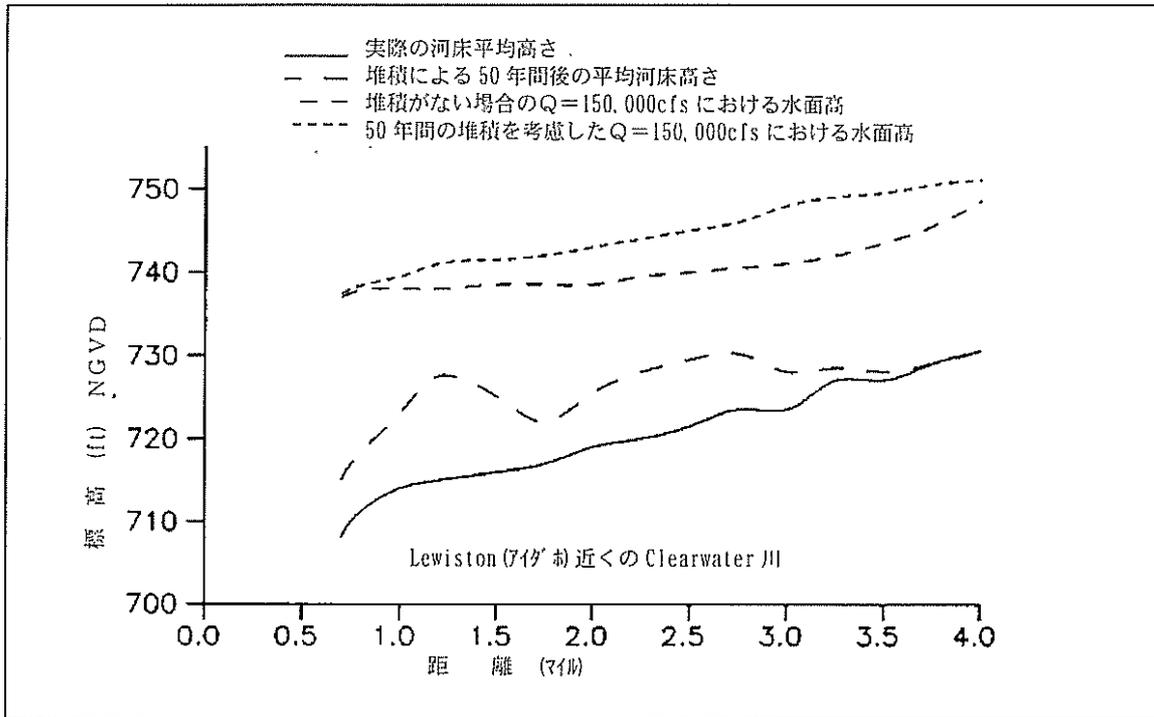


図 7-13 水面および河床表面の標高

残念なことに、性能の質は、問題特有の特性によって定義され、多分、他の問題へは適用できないでしょう。エンジニアが、モデルの性能に満足するか、更なる調整を必要とするかを決定するための判断材料として使用されることとなります。

e. モデル性能の修正 算出された結果が観察された傾向に合致しない場合、以下のステップを踏みます。最初に、流入地点および流入地点から下流における、現地観測結果からの河床分類曲線とハイドログラフの端部の流量において、横断面で移動する河床を分類します。モデルが実現現象で支配的なプロセスを再現している場合、重要なパラメータはよく適合しているはずです。以下の提案は、容認できない「ずれ」がある場合、行うべき思考プロセスを示します。

(1) 最初に、安定している河川の区間で、モデルの上流境界を設け、モデルがその安定を示すことを確認します。これは、区間の上流端部の近くのその横断面は、著しく侵食してはならず、また、堆積してはならないことを意味しています。

水理的な問題がモデルの下流端部で始まり、上流端部の方へ進むことに気を配ってください。流送土砂の問題に関してはその方向を反対にしてください。それがモデルのその地点から上流で妥当な挙動を示すまで、モデルの下流端部での洗掘または堆積に関して気にはいけません。

(2) 次に、あらゆる係数またはプロセスを調整する前にモデルが数値的に安定していることを確認します。

(3) 上記の 2 つの状況が満足されたならば、注意を全体的なモデル性能に集中させます。流入する流送土砂の粒径が、事前に得られている「代表的な」ものであることを確かめるために、境界条件をチェックします。モデルの河床が実現現象に適合することを確認するために、河床材料の堆積の深さおよび分類を使用します。モデル河床の分類が流入する流送土砂の混合物によって異なるので、複数の異なる時間に対して整理します。これらのデータにおいてあらゆる矛盾を修正し、再試行します。問題が解決しないで残る場合、起こり得る現地の状況をチェックし、近くの横断面において起こり得る誤差をチェックします。

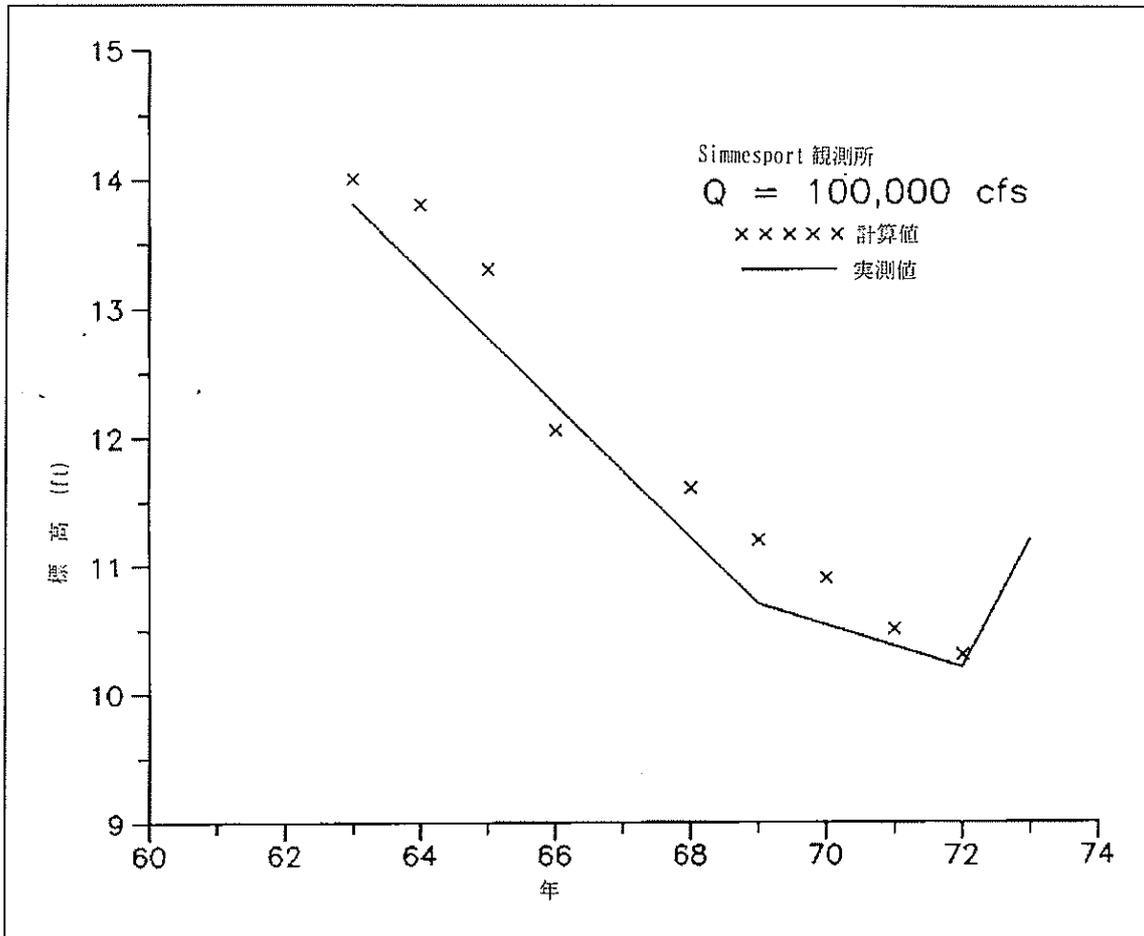


図 7-14 水面傾向プロット (特定の観測地点におけるプロット)

(4) 算出された移動速度があまりに速い場合、被覆層をつくるレキの含有量の実測データをチェックします。

(5) 算出された堆積速度があまりに速い場合、あるいは、侵食速度があまりに遅い場合、モデルにおいて高水敷上を流れる流量が多くなりすぎていないかをチェックします。

(6) 最後に、上記のいずれのチェックにおいても満足できる性能がもたらさない場合、流入する流送土砂量を変更します。最初に、曲線を変形しないで、一定の比率を用いて修正します。

それが成功しない場合、データの許容する範囲内で曲線を変形させます。

7-10. 基礎試験の開発と代案の解析

移動床シミュレーションの最も適切な利用は、基礎的な状態で他の成果との比較を行うことです。

a. 基礎試験 ほとんどの場合、基礎的な状態は、「土砂移動を起こさない」を前提とした、河川の挙動のシミュレーションです。たとえば、堆積調査における基礎的な状況では、ダムの上流・下流における断面で計算を行います。多くの場合、このシミュレーションでは、ほとんど真の洗掘または堆積を得られないと考えられます。これは、平衡状態（洗掘はほぼ堆積に等しい）に近い河川区間ではないからです。

b. 試験計画 プロジェクトの選択肢は、適切に基礎試験データを修正することによってシミュレーションから得られます。貯水施設を選択する場合、ダムは「操作規則」を基礎試験モデルに挿入することによってシミュレーションされます。河道改修プロジェクトにおいては、断面形状および粗度を変更される場合があります。大きな変化が予想される場合には、ステップ毎に評価を行います。一度に複数のパラメータを変更することは、結果を解釈するのが難しくなるので、避ける必要があります。たとえば、水路改修プロジェクトを解析する場合には2段階で行うことを勧めます。最初に、粗度の数値を変更し、既存の断面形状において将来の流れをシミュレーションします。それは、将来の状況に合致したマニングの n 値を選択するのに役立ちます。数値を、提案された設計形状、水深、水路のライニング材、設定された高水敷の植物、推定される水路の浮遊物、予定された捨石工、維持の取り決め、に関する考察によって、値を調整します。2番目は、修正された横断面形状を用いてシミュレーションすることによって解析を完了します。また、適当な収縮および拡大係数を選びます。この結果を将来の状況を予測する際の支援材料として使用します。この予測は、工学的な判断および算出結果における特異性を抽出することに用います。これらの中の「不足の事態」は、データが不十分の場所を抽出し、よりよく実現象のシステムの挙動を理解するために、経験豊かな河川技術者によって使用されます。モデルのあらゆる予想外の反応は事前に調整しておかなければなりません。

c. 結果の表現方法 結果は、絶対値というよりはむしろ、基礎ケースからの変化の観点から示されなければなりません。これは、提案されたプロジェクトの影響の評価に用います。

d. 感度試験 通常、調査の過程の間、感度試験を実行すべきです。多くの場合、特定の入力データ（例えば流入する流送土砂量）は、入手できないか相当な測定誤差の対象となります。モデルの結果に関するこれらの不確実性の影響は、 $\pm x\%$ で入力データを修正し、シミュレーションを再実施することによって把握することができます。シミュレーションにおいてほとんど変化がない場合、データ中の不確実性はないものと考えられます。しかし、大きい変化が生ずる場合には、入力データを吟味する必要があります。この場合の改善は、変化が全体に及ぼす影響について見るように一度に1つのパラメータだけ、または量だけを修正することによって、進めなければなりません。

このように実行される感度調査からは、実現象の挙動に対する堅実な洞察が得られ、本当の確実なモデル作成につながります。

セクション V コンピュータープログラム

7-11. はじめに

移動境界シミュレーションのために多くのコンピュータープログラムが入手でき、また、より多くのプログラムが将来作成されるでしょう。2つの広く使われているプログラムを例として以下に記します。これは、徹底的なレビューではありません。特定の調査に関して、特定のプログラムまたはプログラムの集合体の利用の必要性が、初期の段階で検討されていなければなりません。第3章を参照してください。

7-12. 河川と貯水池における洗掘と堆積 (HEC-6)

HEC-6 (アメリカ陸軍工兵隊 1991a) は移動境界モデルです。それは、流送土砂の Einstein の基本的な考え方を中心に公式化されましたが、それは非平衡の場合に関して設計されたものです。Einstein は非平衡の状態に対処しませんが、HEC-6 において、流送土砂が移送状態にある場合、動いている粒子の継続的な交換が、河床表面にあるということに注意することによって、彼の「粒子交換」の考え方が拡張されました。河床での残渣は、河床材料流送の場合のように測定できるかもしれませんが、「ウォッシュ・ロード」の場合のように測定不能かもしれませんが、粘着性のない粒子の場合のように、河床表面の粒子の安定度は、慣性 (イナーシャ) と関連があるかもしれませんが、または、粘着性のある粒子の場合のように、その安定度は、主に電気化学的なものかもしれませんが、粒子を移送するために作用するエネルギー力は、低水敷の流れの場合のように、主に重力に起因するものかもしれません。または、その力は沿岸域の場合のようにエネルギー源、例えば重力、潮汐、波、密度流の組合せであるかもしれません。異なる種類の流送土砂は、流体力学および物理学的な特性を変更する必要性を生じ、水温および化学に対する感度に依存する、異なる関数を必要とすることがあります。

a. 流れの式 エネルギーの保存および連続性に関する式は、様々な運動の式から、時間導関数を削除することによって単純化されます。それは、水面形に関する標準ステップ法を使用して解かれます。式には以下の項が含まれます。

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha U^2/2g)}{\partial x} = S_e \quad (\text{エネルギーの連続性}) \quad (7-2)$$

ここで

g = 重力加速度

h = 水面の高さ

S_e = エネルギー線の勾配

U = 流速

x = 流れの方向の距離

α = 流速の横断方向の分布状態に関する補正

$$Q = UA + Q_1 \quad (\text{水の連続性}) \quad (7-3)$$

ここで

A = 流れの断面積

Q_1 = 横方向からの流入または支川からの流入

$Q = Q_1$ から下流の本川の水の流量

$U = Q_1$ から上流の本川平均の水の流速

b. 摩擦および形状損失　摩擦および形状損失は(7-2)式の S_e に含まれます。河床粗度はマンニングの n 値によって定まります。 n 値は、流量、水面の高さ、河床材料と関連しています。(Limerinos 1970)

c. 流送土砂の連続の式　Exner 等式は、流送土砂の保全のために使用されます。

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + B_s \frac{\partial Y_s}{\partial t} + q_s = 0 \quad (\text{流送土砂の連続性}) \quad (7-4)$$

ここで

B_s = 河床物質のコントロール・ボリューム

Q_s = 流送土砂の量

q_s = 横方向からのまたは支川からの流送土砂量

t = 時間

Y_s = 河床表面の高さ

d. 計算の方法論　HEC-6 で使用される計算の方法論およびプログラムの応用については、アメリカ陸軍工兵隊 (1991a) による HEC に示されます。

7-13. 開水路流れと堆積 (TABS-2)

a. 目的　TABS-2 システム (Thomas および McAnally 1985) の目的は、開水路流、移送プロセス、堆砂の二次元的な数値的なモデリングのために一般化したコンピュータープログラムのセットです。このプログラムのプロセスでは、水路における工学技術および環境状況の解析を支援するためにモデル化されます。システムは技術者や科学者によって使用されるように設計されており、使用者は必ずしもコンピューターの専門家である必要性はありません。

b. 説明　TABS-2 は、二次元的な水理学、移送、河川や貯水池や湾や河口における堆砂プロセス、を調査するための数値的なモデリング・システムに統合された一般化されたコンピュータープログラムおよびユーティリティ・コードの集合体です。システムの略図を図 7-15 に示します。

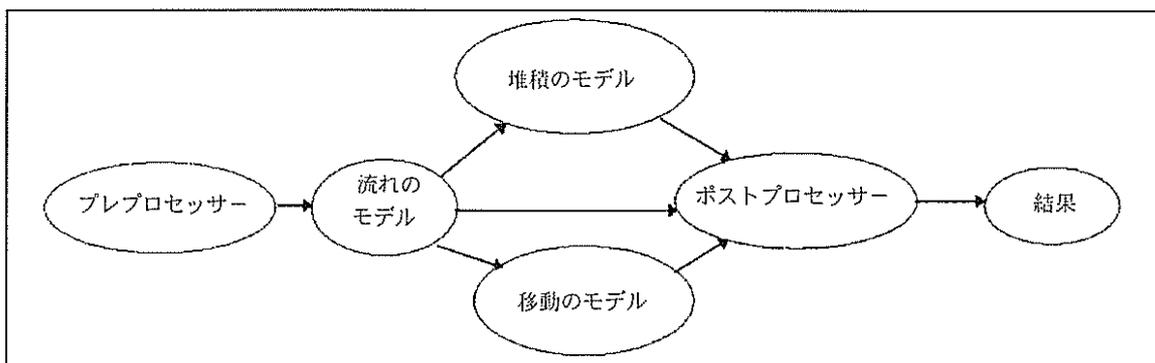


図 7-15 TABS-2 の略図

c. 使用 それは、独立型のソリューション技術として、あるいは複合型モデリング・アプローチにおけるステップとして、使用することができます。基本的なコンセプトは、水面高、流れパターン、分散的な移送、流送土砂の侵食、移送および堆積、河床表面の高さ、を計算することで水理学へフィードバックします。

既存および計画された断面形状は、流量、堆砂、塩度濃度に関する影響度を判断するために解析されます。構造物および中州の周辺の算出された流速パターンは特に重要です。TABS-2 のいくつかの応用は 3 章を参照願います。