研究ノート

河床変動計算の精度と再現計算の重要性

嶋（しま）　大尚（ひろなお）
（一財）砂防・地すべり技術センター
砂防技術研究所
技術開発研究室長

1. 数値シミュレーションの必要性と信頼性

水・土砂の流れや河床変動のような複雑な自然現象を予測するために、その現象を数学的にモデル化（偏微分方程式）した数値シミュレーション技術が活用されています。

この数値シミュレーションによって得られた結果は、『理論解』[1)]ではないという点に留意が必要です。このため数値シミュレーションで求めた解がどの程度正しいのかどうか判断することが必要となります。

そこで、数値シミュレーションモデルを開発する技術者は、その精度を検証するために理論解が分かっている単純な物理現象の再現や過去に発生した土砂災害等の再現を行い、長年のノウハウにより信頼性の高い数値シミュレーションを構築していくのです。

数値シミュレーションモデルで求まる解は近似値ですが、ノウハウを持つ技術者が実施する数値シミュレーション結果は信頼度が高く、有効な解析手法と言えます。

当センターでは、土砂移動メカニズムが異なる掃流（泥流）、土石流、火砕流、溶岩流等、流れの氾濫解析や河床変動計算を実施するために、1995年頃から「J-SAS」という2次元氾濫シミュレーションパッケージソフトを開発してきました。その後、2003年からは「J-SAS」より施設効果等が高精度に計算できる「New-SASS」という平面2次元河床変動プログラムの開発・改良を継続して実施しています。また、New-SASSでは数多くの土砂災害の再現計算も行っており、その信頼性を検証しています。

2. 数値シミュレーションの精度と信頼性

自然現象を予測するためには偏微分方程式を数値シミュレーションで解く必要があるのですが、コンピュータは偏微分方程式をそのままの形ではで解くことができません。コンピュータは四則演算しか解くことができないのです。

そのため、数値シミュレーションを実施するためには、偏微分方程式を四則演算に変換する必要があります。これを「離散化」といいます。

この離散化にはいろいろな手法があり、どの手法を選定するかによって数値シミュレーションの精度（誤差）や安定性、収束性、計算時間が大きく影響されます。求める現象に対して離散化手法が適切でなければ、計算が発散（解が求まらない）したり、計算時間が長くなったり、あるいは誤った解を算出することになります。

つまり、同じ基礎式（連続式・運動方程式）を用いている数値シミュレーションモデルであっても離散化手法が異なれば、厳密には同じ解（計算結果）にはならないのです。

多くの機関で数値シミュレーションモデルの研究・開発が行われていますが、離散化等の技術については各機関の資産であるため、一般的にはすべてを公開していないのが実情です。

このような背景から、同一場所における同一条件の現象を同じ基礎式であっても、どの機関が計算しても計算結果は同じということにはならないのです。

このため、例えばある土石流危険渓流における無施設時と施設配置後の氾濫範囲の差分をとって、配置した施設の効果を評価したい場合、これらの無施設時と施設配置後の2つの氾濫計算は同一の数

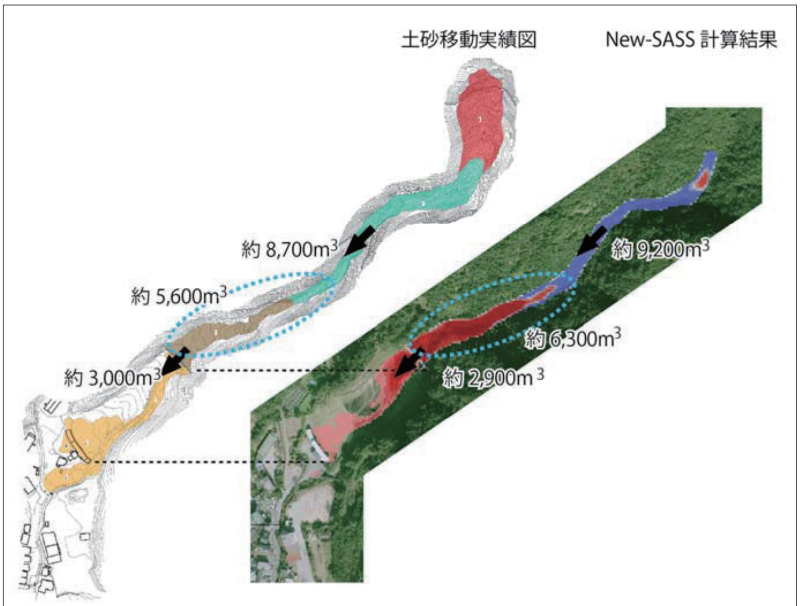

図-1　New-SASSによる再現計算事例

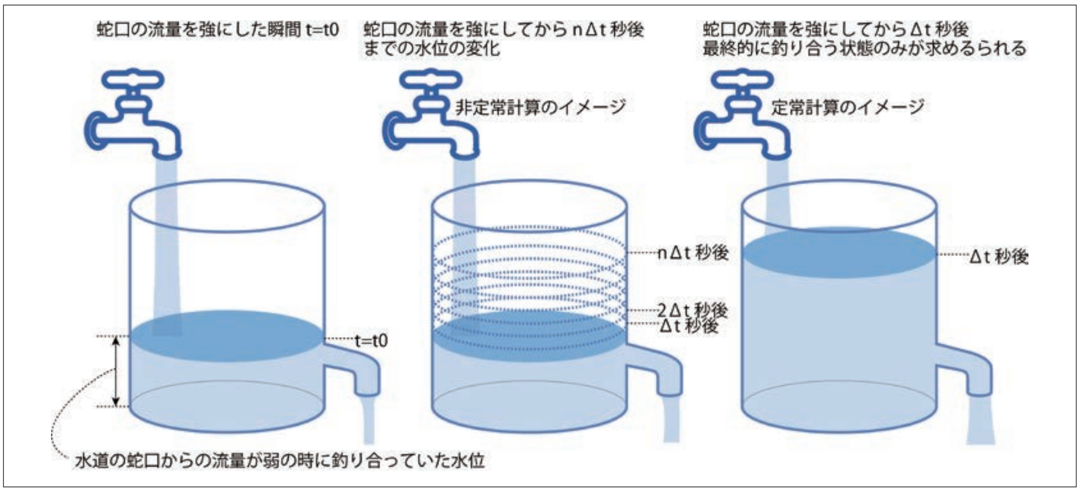

図-2　定常計算と非定常計算の違い

値シミュレーションモデルを用いて評価しなければ整合性がとれなくなる可能性があるということに留意が必要です。

離散化手法には差分法、有限要素法、有限体積法、境界要素法、格子ボルツマン法、粒子法、個別要素法など様々な手法がありますが、それぞれに長所と短所があり、一概にどの手法が良いとはいえません。

離散化手法は求めたい現象や計算範囲（スケール）に応じて選定することが重要です。「透過型堰堤での流木の捕捉率を予測する」と「土石流の到達範囲を予測する」のように目的が異なる場合や、「水系砂防のような広域な流域の計算」と「土石流危険渓流のようにある程度限定された流域の計算」のように計算スケールが異なる場合には最適な離散化手法は異なるため、砂防技術としての数値シミュレーションモデルを構築する場合には、解析が必要とされている現象やスケールを考慮した離散化手法を選定することが重要です。

当センターで開発している「New-SASS」は精度と計算効率のバランスのとれた有限体積法を採用しています。

3. 数値シミュレーションにおける定常と非定常

数値シミュレーションモデルには「定常」と「非定常」という違いもあります。これらの違いについて、図-2に示す例で説明します。

流量を強・弱の2段階に変えることができる水道の蛇口があります。準備段階として流量を弱にして十分長い時間、タンクに水を注ぎ続けました。その結果、t=t0の時刻には水位が一定の位置で安定した状態になっているとします。

その状態から一気に蛇口からの流量を強に変えたとすると、実際の水位は何秒間かかけて上昇し、ある水位に達すると蛇口からの流入量と出口からの流出量が釣り合う位置で水位は安定します。

このような、時間経過とともに変化する状態（水位）が表現できる計算を非定常計算と呼んでいます。

一方で定常計算では時間経過とともに変化する状態（水位）は表現できないため、蛇口から出る流量を強にした瞬間、最終的に釣り合う水位のみが計算されてしまいます。

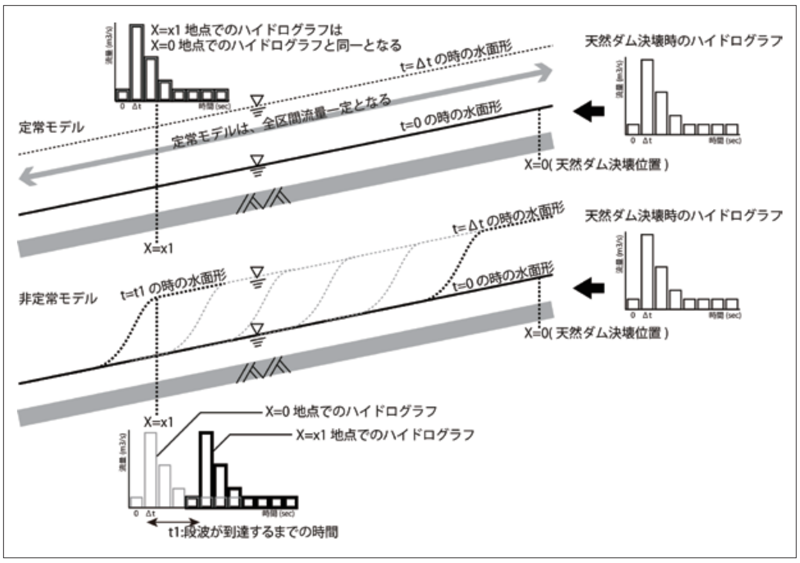

図-3　定常モデルと非定常モデルの計算可能現象の違い

これらを踏まえて、「山奥に形成された天然ダムが決壊した場合、決壊によって発生した段波が下流域の集落まで到達する時間を予測したい場合」は定常・非定常、どちらのモデルで計算するのが適しているのでしょうか。

図-3に示すように上流端の流量が短時間で急激に変化し、それが下流域に伝搬する現象は「定常な状態」ではありません。

そのため、定常モデルで計算すれば、上流端の供給する流量がピーク流量になった瞬間、計算区間全域がピーク流量になってしまうため、目的の現象が評価できません。

一方、非定常モデルでは、時間経過と

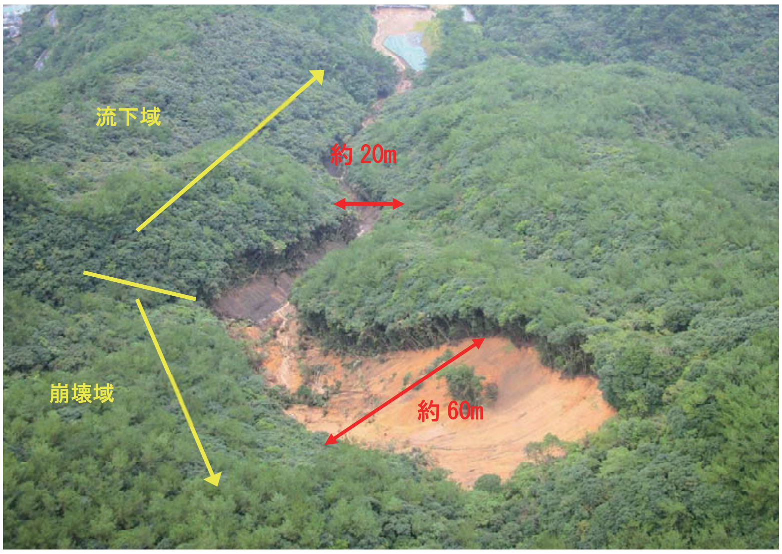

図-4　崩壊地の幅と流下幅

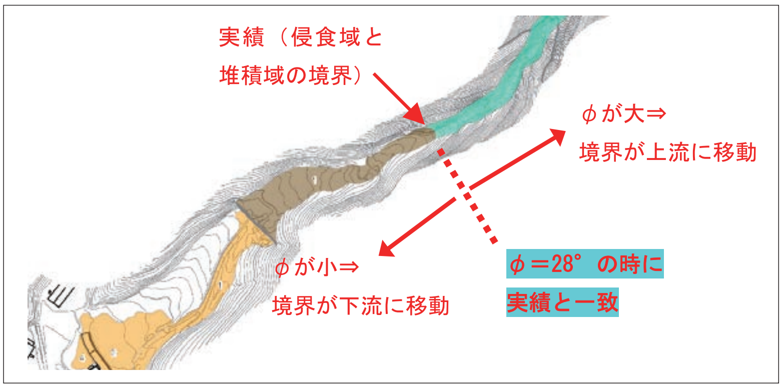

図-5　数値計算結果の判断基準

ともに変化する水位を表現することができるため、ピーク流量が下流域に到達するまでの時間を予測することができます。

逆に、上流端から供給する流量の変化が十分遅く、計算区間の流量変化をほとんど気にする必要が無い現象を評価する場合は定常計算モデルにもメリットがあります。

当センターで開発している「New-SASS」は急激な流量変化の途中経過も表現できる「非定常モデル」を採用しています。

4. 土砂災害の再現計算

過去に発生した土砂災害の再現計算を実施することは、数値シミュレーションモデルの精度の検証だけではなく、発生した土砂災害の特徴を計算パラメータの設定値を通して把握することができます。

今回は図-1で紹介した鹿児島県奄美大島の与蓋川で発生した土石流災害を事例にNew-SASSを用いて実施した再現計算と土石流の特徴について紹介します。

現地調査結果から得られたこの土石流の特徴は、①流下した堆積土砂の上に水位の痕跡が見られない、②崩壊地の幅（約60m）に比べて流下幅（約20m）が極端に狭い、③侵食区間と堆積区間が明確に分かれているということでした。このことから、この土石流は流水によって流されたものではなく、崩壊土砂自体が水を含んで流動化したもので、一般的な石礫型と呼ばれる土石流よりも流動しやすかったのではないかと推定できます。

土石流の流動化を支配している要素には、粒径（構成材料）、河床勾配など様々なパラメータがありますが、そのうちきわめて重要であるにもかかわらず、土質試験等による計測が困難なパラメータに土石流の内部摩擦角があります。

石礫型の土石流であれば、内部摩擦角を30～35度に設定すれば良好な再現計算ができることが多いのですが、与蓋川で発生した土石流は一般的な石礫型土石流よりも流動性が高いことが現地調査結果などから分かっているため、内部摩擦角を30度以下に設定する必要があると当たりを付けます。

このような推定を行うことによって、効率的に再現計算ができるだけではなく、今後実施するであろう異なる渓流での氾濫予測計算に役立つ貴重な経験を積むことができます。

今回の土石流の再現計算は内部摩擦角を28度に設定することで、土石流の到達範囲、流出土砂量および侵食区間と堆積区間の境界位置などを、精度よく再現することができました。その際、パラメータを少し変えた場合の感度分析も重要です。

内部摩擦角を変化させれば、図-5に示すように侵食域と堆積域の境界が移動します。このような積み重ねが非常に大切であり、技術者がこのようなノウハウを持つことは数値シミュレーションモデルの優劣と同等以上に重要であると考えています。

5. 今後の取り組み

現在、数値シミュレーション技術の向上とともに、コンピュータの処理能力も向上してきているため、ある程度複雑で広範囲の計算が可能になってきていますが、3次元河床変動計算モデル等を用いた複雑な検討はまだまだ少ないのが現状です。

今後は、計算の高速化技術等の研究も必要となりますが、当センターでは精度の高い氾濫箇所の推定や砂防施設の効果を検討するために、これらの技術を積極的に取り入れていく必要があると考えています。

1）理論解：ある与えられた方程式について誤差なく求められた解。