

## 論文内容の要旨

論文題目 洪水氾濫・土砂崩壊シミュレーションの安定性・信頼性改善手法の開発

氏名 張 馳

日本は世界有数の地震・火山国であること、急峻な地形や脆弱な地盤が多く、気象的には梅雨や台風などによってしばしば豪雨がもたらされること、などから自然災害（津波、洪水氾濫、地震やそれに伴う土砂災害など）への対策は、歴史的に国や自治体の最重要施策の一つと位置づけられてきた。世界的に見ても、近年、欧米先進国・途上国を問わず非常に大きな自然災害が頻発する状況もあり、その対策は各国行政の共通の課題でもある。

行政が行う自然災害対策（防災施設建設、ハザードマップ作成・避難計画など）の起案・調査・施工においては、不確定性が強く大きなスケールの自然現象に対する十分な科学的評価を実施し、それを市民へ説明することが常に求められる状況がある。このための手段として数値シミュレーション技術があり、将来の水文変動などを想定した多数のケーススタディや対策優劣の判定・リスク評価を行うための不可欠の道具でもある。今後ともコンピュータ技術の進展と合わせて、評価信頼性向上のための一層の技術開発が必要と考えられる。

以上のような背景から、本論は洪水氾濫や斜面崩壊・地すべりなどの土砂災害に関する数値予測を主題として種々の角度から検討を行い、新たな数値手法およびモデルの提案を行ったものである。本文は二つのテーマで構成されている。第一のテーマは「洪水氾濫に関する高速安定化数値解析手法の開発」、第二のテーマは「安定化数値解析による崩壊土塊の到達範囲予測」である。以下に、個々のテーマに関する研究内容および成果を示す。

### 1. 洪水氾濫に関する高速安定化数値解析手法の開発

洪水氾濫の非定常数値解析を安定に行うためには浅水長波方程式に対する CFL 条件を満足する必要があるが、それを満足しても氾濫計算では水量の連続性に問題が生じることが知られている。特に、地形が大きく変化している場所などでは、洪水氾濫流の速度が速く水深が急激に変化する。こうした場合、従来の解析法では時間ステップが大きいと負の水深が生じやすく、水の質量が保存されない。また、それにより計算の不安定が問題となる。負の水深が生じないようにするには時間ステップをかなり小さく設定する必要があるが、広範囲で長時間の洪水氾濫の数値計算を行う場合、処理時間が膨大となる。また、氾濫水の水際線が時々刻々に変化するため、どの程度の時間ステップが適当かを判断することは

難しい。このような状態に鑑みて、本研究では質量保存を守ることにより計算精度を高め、それにより安定性の向上と計算時間の短縮を可能とする格子流出量修正法を提案した。

- 1) 本研究では平面2次元浅水長波方程式の解法として、未知量を staggered に配置する leap frog 法を採用した。運動量方程式の差分は時間に関しては前進差分、移流項には一次精度風上スキーム、圧力項には中心差分、抵抗項には Vasiliev の不安定を避けるため陰的な取り扱いを用いた。また、連続式の差分は時間に関して前進差分、空間に関して中心差分を用いた。
- 2) 解析中に負の流動深が生じる場合、提案した格子流出量修正法では次の修正を行う。まず、計算格子の流出フラックスを修正して格子の水深を0にする修正係数を求め、それにより流出フラックスを修正した後、もう一度全体解析領域の水深を計算する。負の流動深が生じた格子の流出フラックスを修正すれば隣の格子の流入量が減少するために、その流動深が負となる可能性があるため、全域で負の流動深がなくなるまで反復修正し、次の時間ステップへ移る。以上の手続により、質量は常に保存されることになる。本研究では、デカルト座標系と一般座標系による氾濫解析プログラムを作成すると共に、この方法を両者に組み込んだ。
- 3) 報告されている単斜面氾濫台での実験結果と計算結果との比較によって、開発したプログラムの解析精度を検証した。また、傾斜を変えた数値実験により、格子流出量修正法を使わない場合には、氾濫台の勾配が大きいほど質量保存誤差が大きくなること。逆に格子流出量修正法を適用した場合は質量が完全に保存され、解析精度も保たれることを示した。
- 4) 急勾配地形の洪水の例として1858年の常願寺洪水の観測記録に基づき再現解析を行い、大規模洪水氾濫解析における提案手法の特性を質量保存誤差、安定性、精度、CPU時間の観点から検討した。

格子流出量修正法を適用しない場合、急勾配地形での氾濫数値計算では、CFL条件を満足しても時間ステップが大きくなると質量保存誤差が大きくなり、それによる数値発散が生じることが認められた。格子流出量修正法を適用した場合、格子流出量修正法を適用しない場合の数倍～数十倍の大きな時間ステップでも、十分な実用精度が得られ、また、計算時間の大幅な短縮が可能であることが分かった。
- 5) 河川周辺の地形や人工物を表現する柔軟性の観点から、一般座標系における氾濫解析プログラムの有効性を検討した。豊岡市における破堤氾濫の事例を用いて数値モデルを作成した結果、デカルト座標系モデルに必要な格子数を一般化座標系モデルにより大幅に

減らすことが可能であり、計算結果は定性的にほぼ同様であることが判明した。また、一般座標系モデルの数値計算では、デカルト座標系モデルの場合より時間ステップを小さくする必要があり、修正法の繰り返し回数も増える傾向があるが、格子数の減少により、計算時間を大きく短縮できる可能性が示された。

今後、種々な洪水氾濫事例を解析し、本計算手法の汎用性を検討する予定である。また、広域水循環モデルと結合したリアルタイム洪水氾濫予測の開発につなげて行きたい。

## 2. 安定化数値解析による崩壊土塊の到達範囲予測

日本では、集中豪雨や地震等に伴う土石流、地すべり、崩壊等の土砂災害が、過去10年の年平均で約1000件発生しており、国民の生活に多大な被害を与えている。これら土砂災害の防止あるいは被害の軽減には移動土塊の到達範囲を把握することが重要である。本研究では従来の崩壊土塊運動モデルにおける問題点を改善し、再現性と実用性を高めた解析手法を提案した。

- 1) 本研究では崩壊土塊の発生・流動・堆積のメカニズムを踏まえ、土のクーロン摩擦と間隙水圧の効果を考慮したクーロン混合モデルの採用、深度平均理論に基づき土塊の運動停止前後での底面クーロン摩擦の不連続な挙動を考えた運動の開始・停止条件の考慮、さらに移流項の三次精度風上スキームと格子流出量修正法を導入し、崩壊土塊運動のシミュレーション手法を開発した。
- 2) 斜面模型実験や既報実験データを用いて提案手法でシミュレーションを実行し、その再現性・安定性・有効性を検証した。まず、著者の模型実験で得られた斜面・水平面上の土塊（乾燥砂）の運動・堆積の実測結果が、測定されたパラメータを用いた計算により比較的良好に再現された。また、Denlingerら、およびHutterらの乾燥粒子流による小型模型実験結果と計算結果の比較を行った結果、崩壊土砂流の先端部と後尾部の速度、位置、長さの経時変化、堆積状況が比較的良好に再現されることがわかった。一次風上差分による計算結果との比較、崩壊土砂の底面摩擦と内部摩擦を変える数値実験などから、採用した三次風上法や運動開始・停止条件の適切さが示唆された。
- 3) 三つの土砂災害事例を利用し、提案手法の妥当性を検討した。まず、弘前市郊外で発生した斜面崩壊をシミュレーションした結果、堆積範囲に関しては、地形モデルの精度および樹木の影響等により一部再現性の悪い部分があるが、おおむね現地の実測結果を再現可能であった。三陸南地震による築館町で発生した流動型地すべりの解析結果は、実測結果と比較して堆積範囲の再現性が良好であった。

さらに、鳥取県 A 地区の数度の土砂崩落事例に関して解析し、最後の崩壊時の堆積範囲を、それ以前の崩壊時に対し実験的・試行錯誤的に求められたパラメータにより良好に再現可能であることを示した。

また、格子流出量修正法の効果により、それを使用しない場合より大きな時間ステップでの安定な計算が可能であることが明らかとなった。

今後、土塊の流動中における間隙水圧の変化と粒子間衝突損失の評価および流動に影響を与える構造物、樹木などの抵抗モデルの評価、土塊運動の物理定数の決定手法などの検討も進めてゆく必要があるだろう。