

緊急時における災害想定のための高効率な氾濫計算プログラムの開発

国立研究開発法人土木研究所 ○高橋 佑弥*, 藤村 直樹, 水野 正樹

*: 現 株式会社地圏総合コンサルタント

1. はじめに

天然ダムの決壊や火山噴火後の降灰に起因する土石流では大規模な流出流量が想定される場合があり、その被害のおそれのある範囲を推定するためには極端に長い流下距離や広大な氾濫範囲をカバーする数値標高データを用いて二次元氾濫計算を実施しなければならない。また、起伏の激しい山地河川の微地形を表現するためにはできるだけ高い解像度の数値標高データを用いる必要がある。一般的に用いられる計算機ではこのような条件での氾濫範囲の推定に長い計算時間や多くの計算容量を要し、危険が逼迫する状況下では十分な検討を行うことができない。本研究では、①任意形状の計算領域に対応するデータ構造の設計、②計算アルゴリズムの改善と並列化計算の実装を行い、高効率な氾濫計算プログラムを開発した。開発プログラムについては計算結果と理論解の比較による妥当性の確認と、従来用いていた同様の計算モデルを計算するプログラムを対象に計算の効率化状況の確認を行った。

2. 氾濫計算

2.1 支配方程式と任意形状領域に対応した離散化

氾濫現象の支配方程式は高橋ら¹⁾の方法に則り保存型の浅水流方程式とし、差分法により離散化を行う。本研究では境界条件を流入境界、水際境界、流出境界、壁境界とし、これらが重複すること無く計算領域を取り囲んでいるものとする。流入境界では流量フラックスと流入勾配を与え、水深は等流水深で与える。流出境界では越流式により水深から流量を決定し与える。壁境界ではスリップ条件を想定し、境界法線方向の流量をゼロとする。本研究では水際境界には特別な処理を与えなかった。

通常、差分法では、矩形の計算領域に対し構造格子を構築するため、行・列方向に i, j 等のインデックスを用いて計算格子点を管理している。このため、斜行や蛇行する溪流においても、これを包絡する矩形領域を確保しなければならず計算容量の面で不利となる。本研究では計算領域の削減のため、数値標高データを谷筋に沿った任意の多角形で想定最大氾濫範囲を抽出し計算を実施できるように差分式の書き換えを行った。任意の多角形の範囲で抽出した格子点に対し一連の格子点番号を付し、差分式を評価する格子点に P 、隣接する格子点に E, N, W, S 等評価格子点からの方角を添字に取って (図-1 参照) 変

数を表記した。これによりローカルな接続関係のみを用いて差分式を評価することが可能となり、任意形状計算領域でも計算が実施できる。 x 方向の運動方程式と連続式の差分式は次のように書き表せる：

 x 方向の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 \right) + \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 u \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 v \right) \\ & = \rho h^3 \left(\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 \right) + \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 u \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 v \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 \right) + \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 u \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 v \right) \\ & = \rho h^3 \left(\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 \right) + \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 u \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 v \right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 \right) + \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 u \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 v \right) \\ & = \rho h^3 \left(\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 \right) + \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 u \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 v \right) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

連続式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 \right) + \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 u \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{2} \rho h^3 v \right) = 0 \quad (4)$$

ここに M τ はそれぞれ x 方向、 y 方向の流量フラックス、水深、 x 方向、 y 方向の移流流速、底面せん断応力を表す。(1)式の移流項にあたる XDX 、については高橋ら¹⁾に従い流量フラックスおよび移流速度の方向から上流方向を判定し、風上差分を行った。

2.2 計算の高速化

2.2.1 水域のインデックス化

従来の計算プログラムでは運動方程式 (x 方向および y 方向)、連続式を解く際に計算格子点一点一点を捜査し、水域格子点であれば水理量計算を行い陸域格子点であれば計算をスキップするような内部分岐を逐次行っているものが多かった。開発プログラムでは時間ステップ毎に一度だけ水域/陸域のチェックを行い、水域格子点のみ水理量の評価対象とするアルゴリズムとした。

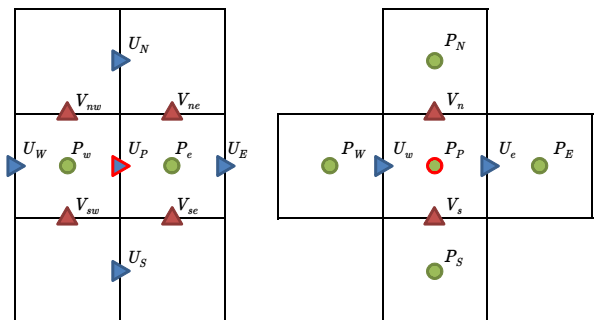
a) 運動方程式格子点 (x 方向) b) 連続式格子点

図-1 格子点の接続関係

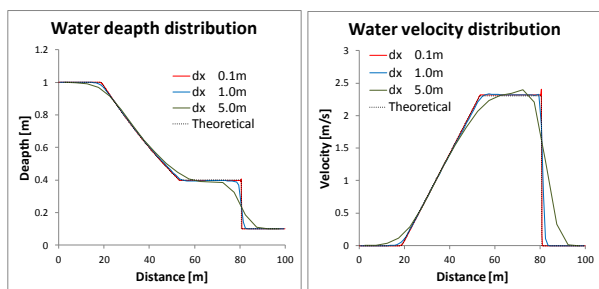


図-2 ダム決壊問題理論値と計算値の比較

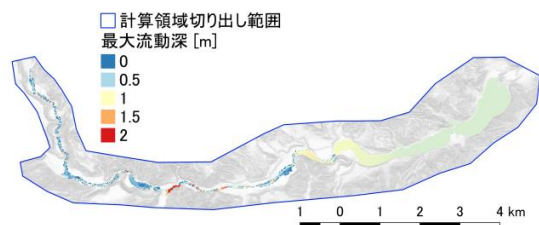


図-3 計算格子切り出し範囲と最大流動深分布

2.2.2 並列計算

並列計算には大きく分散メモリ型、共有メモリ型の2つのタイプが有る（あるいは2つのハイブリッド）。分散メモリ型の並列計算はPC等を1つのノードとし、複数のノードをネットワークで接続して計算環境とするが、計算環境が大規模になることや通信の制御を正しく行わなければならないため、緊急時の対応には向かない。一方、近年のPCではマルチコアのCPUや大容量のメモリが実装され一般に普及している。このため、本研究では共有メモリ型の並列計算を実装することにより、高速化を行った。従来の計算プログラムでの計算処理時間を評価すると、各格子点における最大値の更新に54.9%、時間方向の変数更新に20.5%、運動方程式の計算に10.7%、連続式の計算に9.4%、掃流力の計算に4.5%、その他の計算に0.1%の処理時間を要していた。並列化計算の実装は「その他の計算」以外の計算処理を中心に実施した。

また、青山²⁾などを参考に並列化以外にも分岐処理の削減等の計算処理の効率化を行った。

3. 数値実験

3.1 計算プログラムの検証

開発プログラムの妥当性を検証するためにダム決壊問題の厳密解³⁾と計算値との比較を行った。計算ケースは格子点間隔を0.1m, 1.0m, 5.0mと変化させ、水面形状と流速分布を評価した。厳密解と計算値の比較を図-2に示す。水面形、波速共に概ね厳密解と一致し、数値振動も少なく安定して計算が実施できていることがわかる。しかし、粗い格子点間隔では段波等の水面形状変化点を解像することができず丸みを帯びた水面分布となっており、なるべく高解像度な計算格子が必要であると言える。

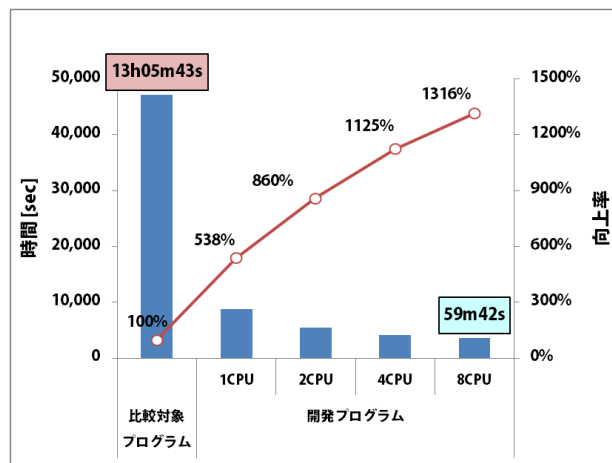


図-4 計算効率の向上状況

3.2 計算効率の検証

ここでは降灰後の土石流を想定して24時間の降雨波形から算出した流出ハイドログラフによる氾濫計算を実施し、従来の計算プログラムとの計算時間の比較および並列化による効率化の評価を行った。基盤地図情報より火山地域の溪流を谷形状に沿って抽出し、20m精度の計算格子を作成した。比較対象プログラムでは同等の範囲の矩形領域を計算範囲とした。図-3に開発プログラムにより計算した計算格子切り出し範囲と最大流動深分布図を示す。

計算時間を比較すると図-4のようになった。アルゴリズムの改良とプログラムのチューニングにより5.4倍程度の計算速度、更に並列化を実装することにより8.6倍～13倍程度の速度向上を得ることができた。本ケースでは13時間を要した計算が1時間程度で実施できている。

4. おわりに

災害時の緊急調査ではより高い解像度での計算も可能ではあったが、計算時間を考慮して50m精度の数値標高データが主に用いられてきた。本研究で開発したプログラムでは従来の氾濫計算プログラムに対し計算アルゴリズムの改良と並列化計算を実装することにより、飛躍的に計算効率を向上させることができた。本研究がより精度が高く迅速な被害想定区域の予測に資することを期待する。

参考文献

- 1) 高橋ら (1986): 堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究, 京都大学防災研究所年報, No. 29B-2
- 2) 青山幸也 (2016): チューニング技法虎の巻, 高度情報科学技術研究機構
- 3) J. J. Stoker: Water waves (The Mathematical theory with applications), Interscience Publishers, 1957