

1 メートル格子を用いた広域の2次元土砂・洪水氾濫シミュレーション

東京工業大学 学術国際情報センター ○青木尊之

(一財) 砂防・地すべり技術センター 嶋 大尚

(一財) 砂防・地すべり技術センター 吉田真也

東京工業大学 学術国際情報センター Marlon Arce Acuña

1 はじめに

近年、大型の台風や線状降雨帯、ゲリラ豪雨などによる土砂・洪水氾濫等の被害が増えている。数値シミュレーションによりこれらを精度よくシミュレーションできれば、土砂災害に対する防災や減災に大きく貢献することができる。さらに、ローカルな気象予測と連結することにより、リアルタイム（現実より早く）で土砂・洪水氾濫を予測できれば、大きな貢献が期待できる。

砂防上流域には川幅が数メートルの河道区間が存在し、上流域の河道網まで精度よく土砂・洪水氾濫をシミュレーションするためには、1メートル以下の格子解像度で土砂移動を数 10km² 以上の流域全体で 1~2 日間 2次元計算する必要がある。

最近の計算機性能の向上は著しく、現在のスパコン世界 No.1 の米国 Frontier にも GPU が大量導入されているように、GPU は演算性能・メモリ性能が非常に高いため、少ない数の GPU（小規模マシン）でも広域シミュレーションが可能である。また、国内にも GPU スパコンは多数導入されていて、それらを利用すればさらに広域のシミュレーションを実行することができる。

本研究の目的は、1メートル解像度の格子を用いてリアルタイム広域 2次元土砂・洪水氾濫シミュレーションを実現することであり、第一段階として本稿では水の流れと河床変動の計算フレームワークを示す。

2 計算手法

水の流れに対して、河床勾配項とマニング粗度係数で規定される底面摩擦勾配項を含んだ 2次元浅水波方程式を有限体積法で解く。セル境界の物理量は流束制限に minmod 関数を用いた 3 次の MUSCL (Monotone Upwind Scheme for Conservation Laws)法を用いる。近似 Riemann Solver として FDS (Flux Difference Scheme) 系列の HLLC (Harten-Lax-van Leer contact) 法を用いる¹⁾。時間積分には 3 段 TVD Runge Kutta 法を用いる。保存形で離散化しているため双曲型方程式の弱解が選択され、人工粘性等は不要である。

水の流れの計算では、浅水波方程式が適用できない乾いた領域に水が浸入する計算を行う必要がある。境界の特異点を避けるため、乾いた領域にも重力では動かない水深 1cm 程度の薄い水の層を仮定している。

河床変動については土砂を粒径で階層化し、粒径階ごとに単位時間あたりにセルに流入・流出する掃流砂量と浮遊砂量を求め、有限体積法で解く。掃流砂量には

芦田・道上の式を用い、無次元限界掃流力には修正エギアザロフ式を用いる。限界摩擦速度は、平均粒径に対して岩垣の式を適用する。浮遊砂の粒径階ごとの沈降速度は Rubey の式を用いる。

3 検証計算

河床変動の検証計算として、永瀬・道上・檜谷によって行われた狭窄部を持つ幅 40cm 水路での実験²⁾との比較を行った。河床砂は均一の 7.46mm 粒径とし、水路上流端からは土砂供給を行わずに流量 4.56l/sec の流入とした。狭窄部や壁は境界条件を設定するのではなく、急勾配の斜面の地形として扱う。実験と同じよう

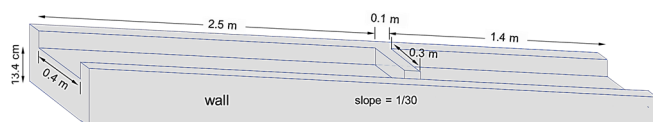


図1 狭窄部を持つ実験流路のモデル

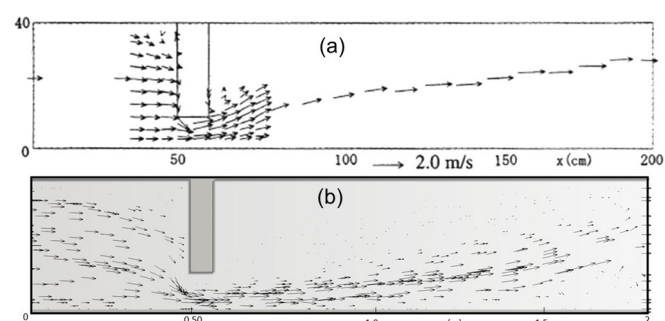


図2 流れの流速ベクトル。(a) 実験結果,(b) 計算結果

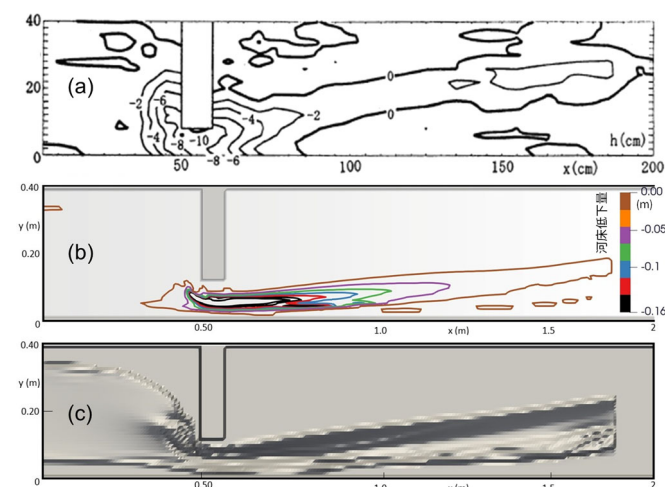


図3 定常状態後の河床低下量。(a) 実験結果,(b) 計算結果（等高線）,(c) 立体表示

に狭窄部の上流に助走区間を設け、 $\Delta x=1\text{cm}$, $\Delta y=1\text{cm}$ で計算を行った。下流端も実験と同じように河床低下が起こらない設定にしている。全領域の河床変動を止めた状態で水の流れだけを計算し、ほぼ定常になった状態から河床変動計算も開始した。

ほぼ定常になった 2 分後の河床低下量を実験と比較した。狭窄部での最大河床低下量は 16cm で、実験の 12cm より深く掘れている。また、狭窄部より下流にかけて深さ約 2cm の「主流に沿った侵食路」が形成されている点は実験とよく一致している。水中安息角を考慮すれば最大河床低下量などは少ないと予想される。計算結果は狭窄部を持つ小規模の水路での実験と概ね一致しており、本計算フレームワークの一つの検証ができた。

4 計算領域

図 4 に示す神戸市東灘区に位置する住吉川流域（流域面積：11.2km²）を計算の対象とする。1938 年（昭和 13 年）年 7 月に豪雨による濁流や土石流が市街地を襲い、600 人を超す犠牲者が出た「阪神大水害」が発生した地域である。図 4 には各支川への集水域も示す。

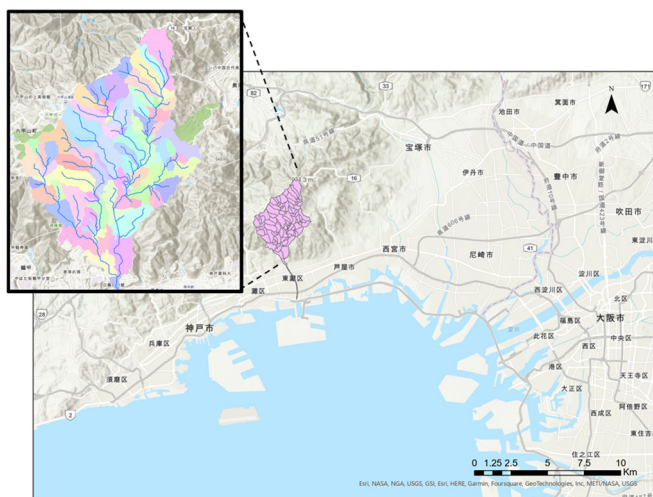


図 4 神戸市東灘区の住吉川流域と支川への集水域

レーザープロファイラによる地形の取得データに対し、河川と道路（橋梁）が交差している地点などは、道路部分を除去するなど河川地形になるように修正を行った。また、堤防の厚さが 50cm 以下のところなども修正を行った。

5 計算メッシュと予備計算

住吉川流域をカバーする図 5 に示す矩形の計算領域は 9km×5km であり、ここを均一な計算格子で計算するのは計算効率が非常に悪い。そこで、仮想的な均一格子を用い、川道から数メートルの距離までの範囲にのみ計算を行うメッシュを配置する Narrow Band と呼ばれる手法を用いる。川道がその範囲を超えて広がったり洪水が氾濫したりした場合には、Narrow Band を広げるために新たな計算メッシュを動的に配置する。

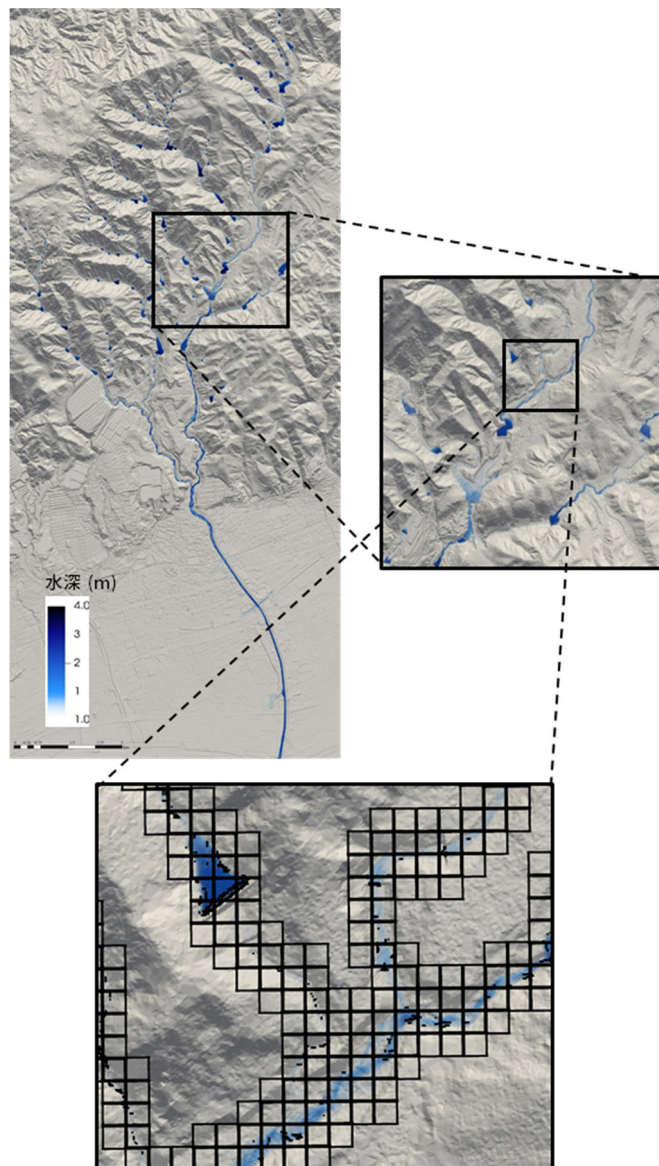


図 5 住吉川流域の流れのシミュレーション結果

降雨に対して、図 4 の各支川への集水域で積分した雨量を支川の川道の面積に比例して配分する降雨項として付加する。図 5 は 100 年確率雨量に匹敵する降雨を与え、ほぼ定常になったときの水位である。下段の格子はメッシュ・ブロックで、GPU 計算を高速化するために、4×4 メッシュで構成されている。

6 おわりに

住吉川流域を 1 メートル格子で計算し、4GPU を用いると水の流れの計算だけであれば実時間で計算できる。多数の砂防堰堤があり、その上流側に水が溜まっていることが分かる。図 5 の結果には土砂の輸送は考慮されていなく、発表時には河床変動の計算結果も示す。

参考文献

- 1) M. A. Acuna, T. Aoki: Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES), Vol. 18, issue 9, pp.2561-2602, 2018
- 2) 永瀬・道上・檜谷: 水工学論文集, 第 40 巻, 1996