

jh230013

リアルタイム土砂洪水氾濫予測を目指した 1 メートル格子の 広域河川シミュレーション

青木 尊之 (東京工業大学)

概要

近年、豪雨や台風などによる河川氾濫が急増しており、川幅の細い河川も危険度は高く、1m 格子を用いて広範囲の河川の水の流れと土砂の輸送を時々刻々とシミュレーションすることにより、リアルタイムで河川氾濫を予測するシステムを GPU スパコン上に構築することを最終目的としている。本年度は単一粒径の土砂を仮定し、小規模実験を再現する検証計算と、細い河川を模擬した 500m の直線水路での掃流砂と浮遊砂の輸送を 1m 格子で計算した。さらに、神戸市東灘区の住吉川流域を計算対象とし、掃流砂と浮遊砂の輸送のシミュレーションを実行した。計算には全域を覆う仮想的な均一格子に対して、川道から数メートルの距離までの範囲に計算を行うメッシュを配置する Narrow Band 手法を実装した。計算を安定化させる sand-slide model の導入や、堰堤などの人工物の近傍は土砂が堆積するが浸食されない固定床のモデルを開発し実装した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京大学 情報基盤センター

東京工業大学 学術国際情報センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

超大規模数値計算系応用分野

(4) 参加研究者の役割分担

青木 尊之 (東工大) : 研究の総括と全ての項目に対する詳細な指示

嶋 大尚 (砂防・地すべり技術センター) : 河川データの整備とシミュレーションとのフォーマット整合

吉田 真也 (砂防・地すべり技術センター) : 河川の観測データとの比較

大西 領 (東工大) : 微気象シミュレーションとの連携の検討

Marlon Arce Acuna (東工大) : 河床変動計算カーネルのチューニング

長崎 孝夫 (東工大) : 掃流砂計算カーネルの実装

Yos Sitompul Panagaman (JAEA) : job の実行

管理

イン イクイ (東工大) : 問題ある地形データの修正

SHEN Dawei (東工大) : 浮遊砂輸送計算カーネルの実装

LIAN Tongda (東工大) : 出力データのリアルタイム可視化

松下 真太郎 (東工大) : カーネル関数の高速化のアドバイス

玉木 幹太 (東工大) : 出力データの処理

TAN HONG GUAN (東工大) : 問題ある地形データの修正

瀧 優太 (東工大) : 水中安息角の検討

内田 遥己 (東工大) : 出口境界条件の試行

北川 翔 (東工大) : 固定床上の堆積と輸送

下畑 和希 (東工大) : 掃流砂輸送計算の安定性の検証

2. 研究の目的と意義

近年、豪雨や台風などによる河川氾濫が急増している。気象予報については数値予報や観測等のさまざまな方面から注力がなされているが、河川に対する警戒は取り組みが

なり遅れている。通常時は地域に降った雨は時間をかけて河川に流れ込むが、豪雨の際は短時間のうちに降った水量がそのまま河川に流れ込み、時に氾濫が発生する。国土交通省からは洪水ハザードマップ等が公開されているが、線状降水帯などによる降水はその時々や地域によって雨量が全く異なり、それに応じて河川の状態も全く異なる。気象庁からは直近の降水量と河川の限定された箇所での水位観測を元にした土砂災害警戒情報が発せられ、自治体の判断で避難勧告等が行われている。防災の観点から、ローカルな気象に合わせた河川状況のリアルタイム予測の重要性は高い。

現在、広域の河川のシミュレーションについては、河川を1次元近似して50m程度の格子を用いた計算が行われている。リアルタイム予測を目的としていなく、河川の湾曲も考慮できていない。2次元計算に至っては限定された領域(橋梁近傍などの200~300mの範囲)を10m~30m格子で計算する程度に留まっていて、広域の2次元計算は全く行われていない。

日本は島国のため多くの山があり、そこに非常に多数の河川がある。川幅は1mから1km程度のものまでであるが、全長(延長)は100kmを超え、細く長い流路となっている。10m程度の川幅の河川氾濫も非常に重要であり、その氾濫を精度よく予測するには広い範囲で水の流れと砂礫の輸送を時々刻々とシミュレーションすることが必要である。

本研究の最終目的は、1m格子を用いて広域の河川シミュレーションを行うことにより、リアルタイムで河川氾濫を予測(数時間先を予測)するシステムをGPUスパコン上に構築することである。そして、ローカルな(微)気象情報と連結し、我が国の防災に大きく貢献をすることを目指す。2023年度は、10km四方の実地形内の河川に対し、水の流れだけでなく土砂の輸送と河床変動まで計

算するシミュレーション・コードを開発することを目的とする。

3. **当拠点の公募型共同研究として実施した意義**
 課題代表者を中心とする東京工業大学のグループは、これまでGPUスパコンを用いて多くの大規模流体シミュレーションを行ってきた。計算科学・計算機科学の両面の専門性を有しているが、本研究課題では土砂洪水氾濫を予測する河川シミュレーションという応用分野であるため、JHPCNの共同研究の枠組みを用いることにより、砂防の専門機関である(一財)砂防・地すべり技術センターと連携することができた。1m解像度の地形データや河床変動予測のための砂礫のデータ、集水域マップ、水位観測等のさまざまな情報の提供を受け、同機関のメンバーと共にシミュレーション結果の評価を行うことができた。また、今後はローカルな降水情報や河川水位等の観測データとのデータ同化など、データ科学的なアプローチも取り入れることを計画しており、まさに学際的な取り組みがJHPCNの共同研究により可能になっている。

4. **前年度までに得られた研究成果の概要**
 新規の課題であるため、該当しない。

5. **今年度の研究成果の詳細**

5.1 計算手法

河川には水の輸送と土砂を輸送する働きがある。土砂の輸送は、掃流砂の輸送と浮遊砂の輸送に分けられる。水の流れに対しては、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いている。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。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、陽的な人工粘性等は導入していない。

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。河床位 z_b に対して、以下の式を解いている。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \sum_i (\nabla \cdot q_{b,i} + q_{su,i} - W_{f,i} C_{b,i})$$

掃流砂の輸送流束 $q_{b,i}$ に以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} q_{b,i} &= \sqrt{sgd_i^3} \left\{ 17\tau_{*,i}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*,c,i}}{\tau_{*,i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*,c,i}}{\tau_{*,i}}} \right) \right\} \\ &= 17u_* \cdot d_i \cdot \tau_{*,i} \left(1 - \frac{\tau_{*,c,i}}{\tau_{*,i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*,c,i}}{\tau_{*,i}}} \right) P_i \end{aligned}$$

i は砂礫の粒径階、 d_i は粒径、 s は水中比重、 $\tau_{*,i}$ は無次元掃流力、 $\tau_{*,c,i}$ は無次元限界掃流力、 u_i は摩擦速度、 P_i は粒径分布である。ここで λ は河床に堆積している土砂の空隙率、 $q_{su,i}$ は河床から浮遊砂の浮上量であり、

$$\begin{aligned} q_{su,i} &= \sqrt{sgd_i} \times 0.08 \left\{ 0.14 \frac{\rho}{\rho_s} \left(14\sqrt{\tau_{*,i}} - \frac{0.9}{\sqrt{\tau_{*,i}}} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{W_{f,i}}{\sqrt{sgd_i}} \right\} P_i \end{aligned}$$

を用いている。浮遊砂の粒径階ごとの沈降速度 $W_{f,i}$ は、以下の Rubey の式を用いる。

$$W_{f,i} = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g d_i} + \frac{36v^2}{d_i^2} - \frac{6v}{d_i}$$

v は水の粘性係数である。 $C_{b,i}$ は底面近傍の浮遊砂濃度であり、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。

各粒径の平均浮遊砂濃度 C_i の計算には、以下の式を解いている。

$$\begin{aligned} \frac{\partial h C_i}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial (C_i u h)}{\partial x} + \frac{\partial (C_i v h)}{\partial y} \right\} \\ = q_{su,i} - W_{f,i} C_{b,i} + \nabla \cdot (D_h h \nabla C_i) \end{aligned}$$

D_h は摩擦速度に基づく拡散係数、 h, u, v は、水の水深、 x 方向および y 方向の流速である。河川の計算では、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も行う必要がある。境目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薄い水の層を仮定している。

堰堤などの人工物の近傍はコンクリート等で造られていて、土砂は堆積するが浸食されない固定床として扱う必要がある。掃流床輸送モデルにおいて、浸食されないように隣接セルで固定床の上に堆積している土砂量が全て移動する量を最大値として制限を掛けている。

一方、自然界の河床は流れに応じて常に浸食と堆積が起こっていて、掃流砂量が場所によって異なると、河床が非常に急勾配になる。実際には水中安息角以下になるように流砂の再分配が行われる。これをモデル化した sand-slide model を河床変動計算に導入することにより、掃流砂輸送の計算を安定化することができた。

5.2 検証計算①

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 40 cm 水路での実験との比較を行った(図1～図3)。河床砂は均一の 7.46 mm 粒径とし、水路上流端からは土砂供給を行わずに流量 4.56 l/sec の流入とした。粒径が比較的大きく、実験している領域が狭いため、浮遊砂量は少ないとして掃流砂のみの計算を行った。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っている。実験と同じように狭窄部の上流に助走区間を設け、 $\Delta x=1$ cm, $\Delta y=1$ cm で計算を行った。下流端も実験

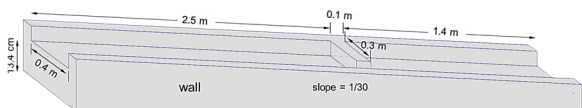


図 1 狭窄部を持つ実験流路のモデル

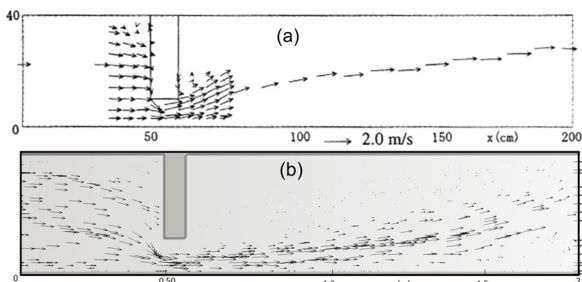


図 2 流速ベクトル. (a)実験結果, (b)計算結果

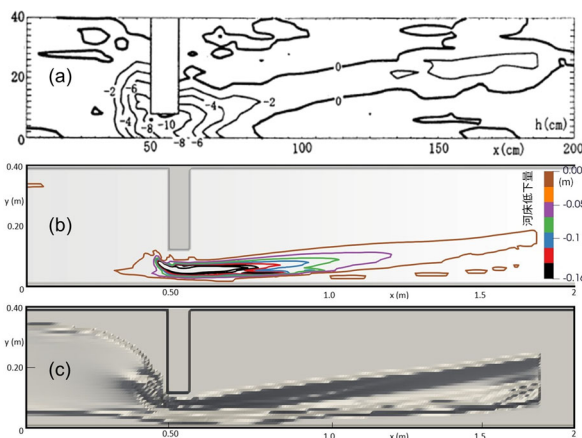


図 3 定常状態後の河床低下量. (a) 実験結果, (b) 計算結果 (等高線), (c) 立体表示

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計算を開始した。

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 16 cm で、実験の 12 cm 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 2 cm の「川みち」が形成されている点は実験とよく一致している。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いる。

5.3 検証計算②

川幅 16m 長さ 500m の実規模の河川を模擬

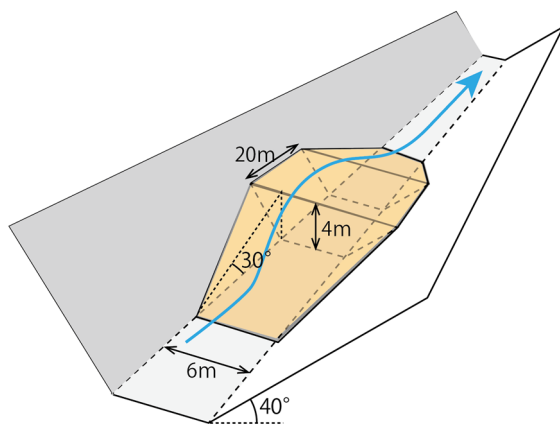
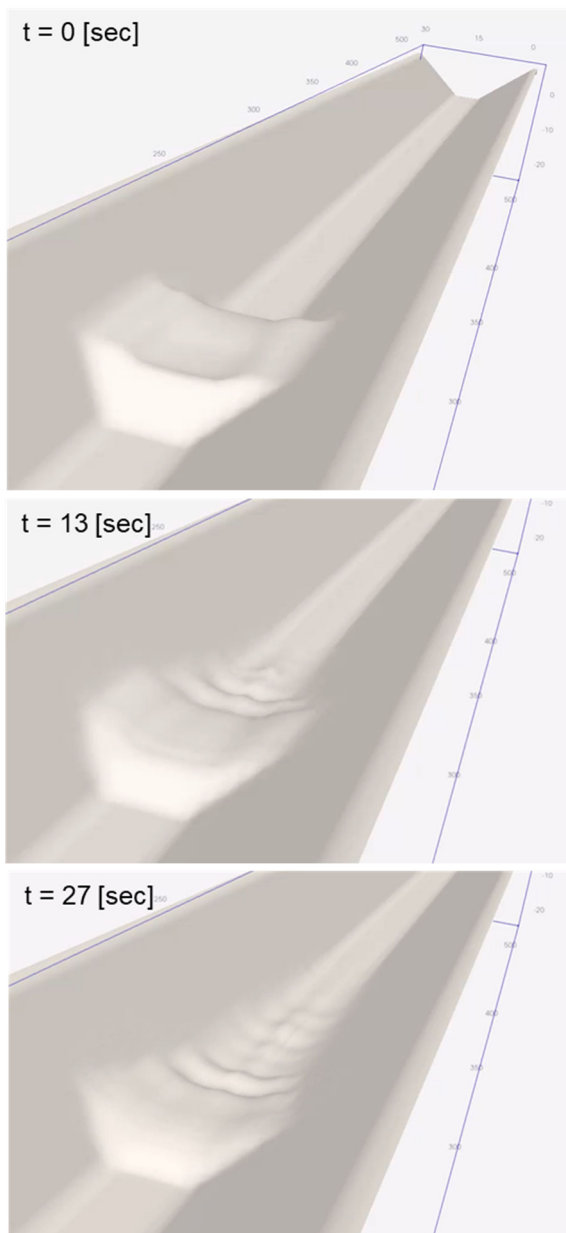


図 4 河床に溜まった土砂の初期状態



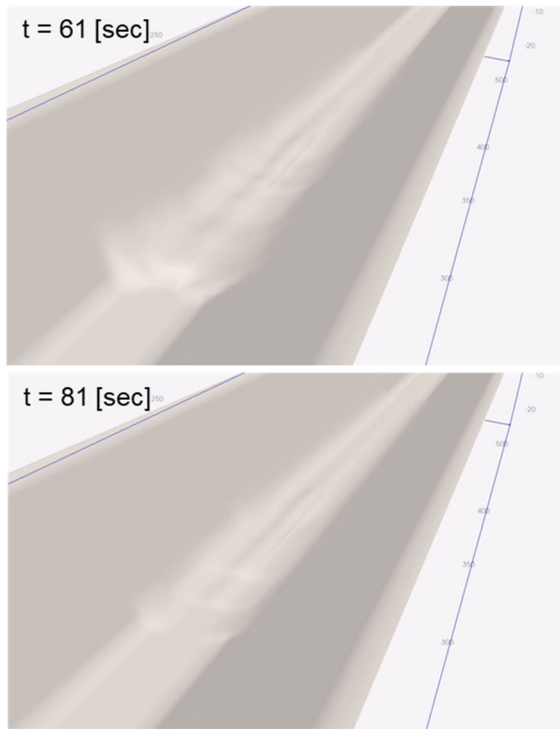


図 5 河床の土砂輸送

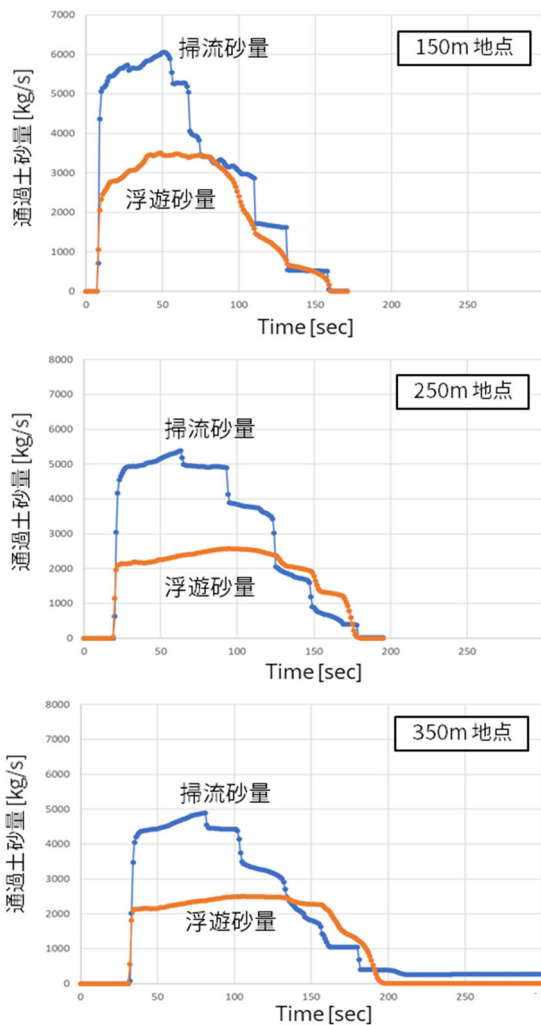


図 6 初期土砂流入地点から 150m, 250m, 350m の地点の土砂通過量

したモデルに対し、1m 格子で浮遊砂の輸送まで考慮したシミュレーションを行った。斜面崩壊などで河道に 870 トンの土砂が流入した状況を想定した初期状態 (図 4) にしている。土砂は単一粒径 1cm、6mm、3mm の礫を仮定した。図 5 に河床の土砂が流れとともに下流に輸送される様子を示す。1m 格子で計算したことにより、波打つような河床紋を形成しながら移動していることが分かる。図 6 に粒径を 1cm としたときの初期の土砂流入位置から 150m、250m、350m 下流の地点での断面を通過する掃流砂と浮遊砂の時間履歴を示す。粒径を小さくすると、浮遊し易くなるため、掃流砂より浮遊砂が多くなる。

5.4 住吉川流域の計算

図 7 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) を計算の対象とした。1938 年 (昭和 13 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 7 には各支川への集雨域も示す。

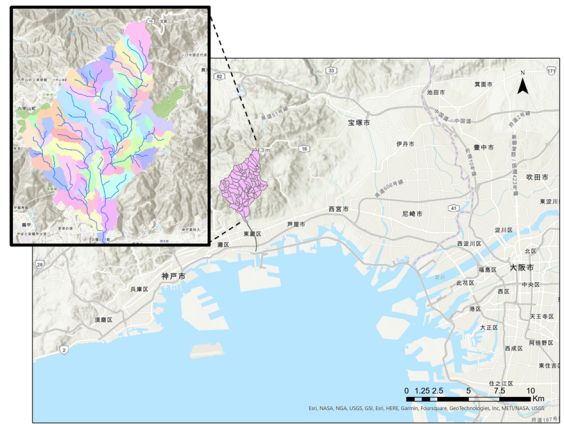


図 7 神戸市東灘区の住吉川流域と支川への集雨域

住吉川流域をカバーする図 8 に示す矩形の計算領域は 10km×6km 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河川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。堰堤などの人工物の近傍は固定床のモデルを適用した。

(a) 水の流れ

降雨に対して、図 7 の各支川への集雨領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 8 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。

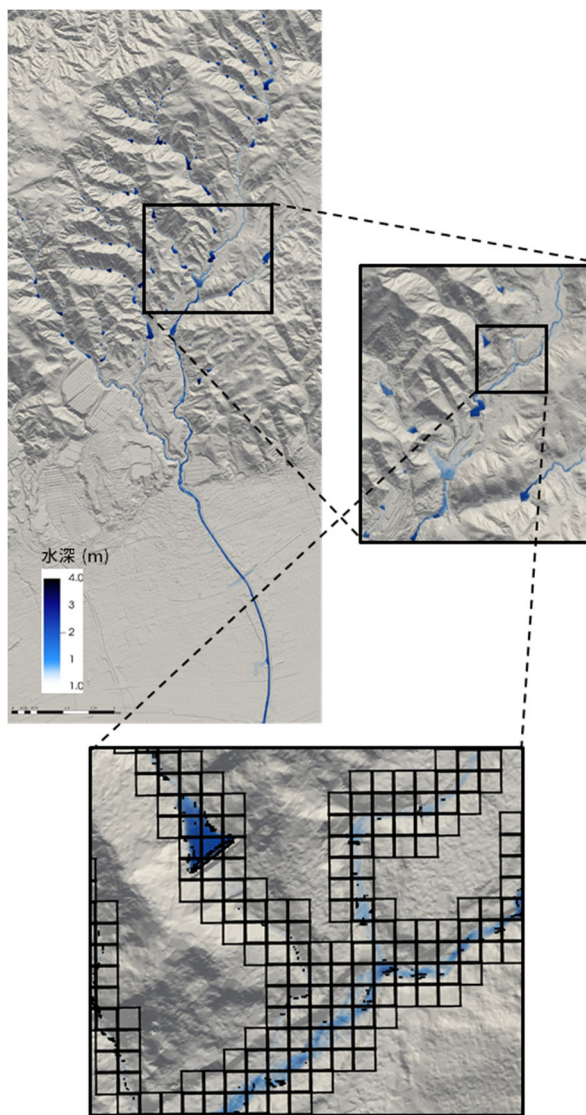


図 8 住吉川流域の水の流れのシミュレーション結果

住吉川流域を 1 メートル格子で計算し、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。

(b) 掃流砂輸送による河床変動

掃流砂輸送のみを考慮した 24 時間後の河床変動を図 9 に示す。

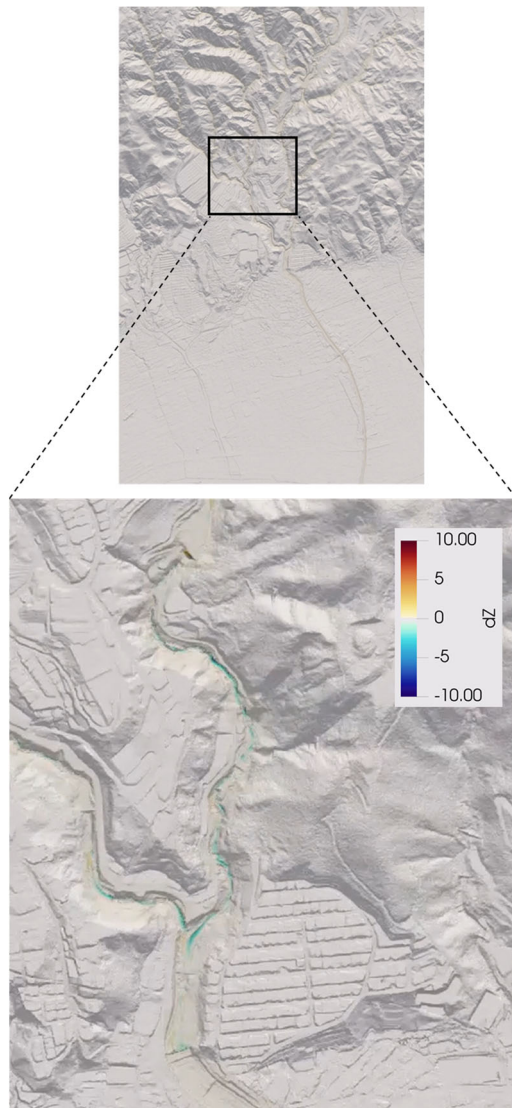


図 9 24 時間後の河床変動

(c) 掃流砂・浮遊砂輸送計算

住吉川の上流に土石流などで一時的に大量の土砂 (3000 トン) が流入したとし、それが掃流砂と浮遊砂として下流に輸送される計算を行った。自然界の河床は長期間浸食されない固くなり、固定床的な振舞をする場合がある。そこで、河床を固定床として計算した浮遊砂輸送を図 10 に示す。かなり下流まで浮遊砂の濃度が高いことが分かる。

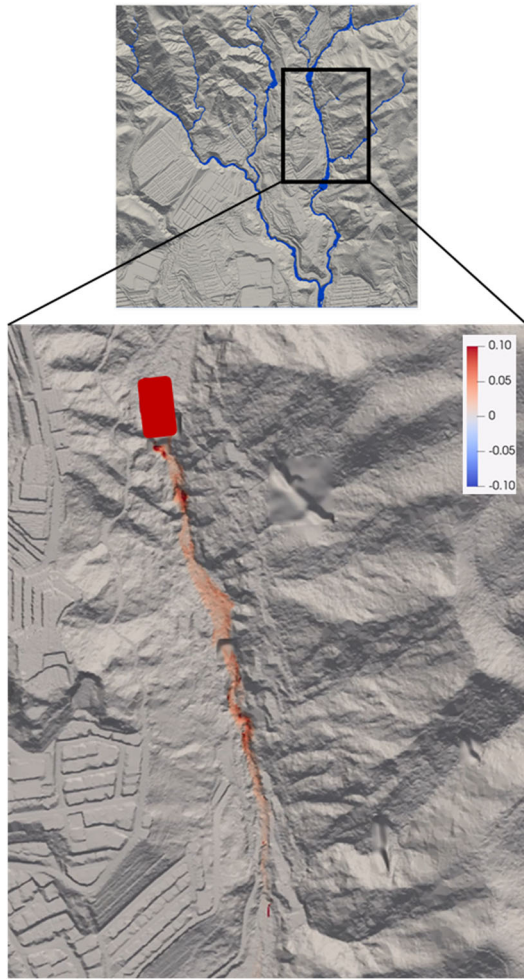


図 10 固定床を仮定した浮遊砂の輸送

5.5 地形データの問題点

広域の地形データの取得は、レーザープロファイラを用いるのが一般的であり、1m 解像度（一部 50cm 解像度）のデータが利用可能となっている。本研究では、1m 解像度の地形データを用いて 1m 格子の流体計算および河床変動計算を行っているため、データ取得に際するノイズの影響を受けてしまう。堰堤の多くは幅 2m 程度であり、1m 解像度はギリギリであることが分かった（図 11）。また、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う必要があった。市街地の堤防の厚さが 50cm 以下のところなども、修正を行わないと、河川が氾濫してしまう誤った計算を行うことが分かった（図 12）。2023 年度は、神戸市・住吉川流域の現地調査を 2 回行った。

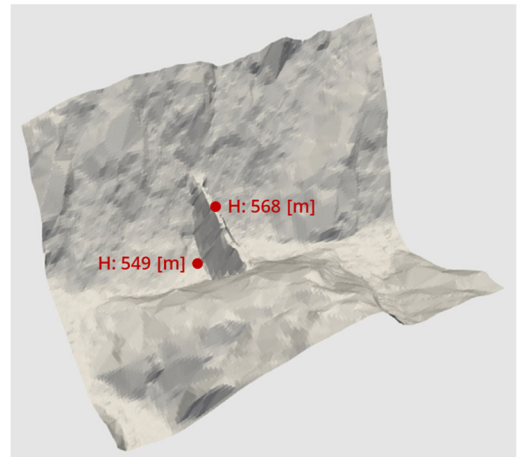


図 11 レーザープロファイラで取得した堰堤周辺の地形データ

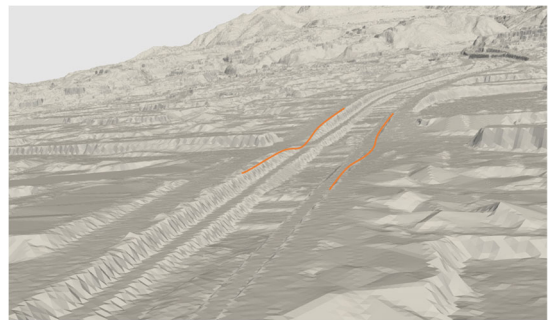


図 12 レーザープロファイラで取得した市街地の河川周辺の地形データ

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

1m 格子で実地形に対し、水の流れと掃流砂・浮遊砂輸送で構成される広域の河川シミュレーション・コードを開発した。掃流砂の輸送計算の安定性を確保することに時間を要してしまい、単一粒径までの計算にしか到達しなかった。今後は礫を粒径階に分けた多粒径で計算できるようにコード開発を続ける。また、土石流の流入を別コードで開発し、カップリングさせることも検討している。

7. 研究業績

(1) 学術論文（査読あり）

なし

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

なし

(3) 国際会議発表（査読なし）

なし

(4) 国内会議発表（査読なし）

- [1] 青木尊之, 嶋 大尚, 吉田真也, Marlon Arce-Acuña, 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, 砂防学会・令和5年度北海道大会, 2023年5月10日（北海道大学）
- [2] Marlon Arce-Acuña, 青木尊之, Shima Hironao, Maya Yoshida, Wide-area river simulation using 1-m mesh resolution for sediment and flood damage prediction, 日本計算工学会・第28回計算工学講演会, 2023年6月1日（つくば）
- [3] Marlon Arce-Acuña, Takayuki Aoki, Shima Hironao, Maya Yoshida: A wide-area river simulation for flooding with 1-m mesh resolution and bed material transport, 日本流体力学会・年会 2023, 2023年9月22日（東京農工大）
- [4] 青木尊之, Marlon Arce-Acuña, 嶋 大尚, 1m格子を用いた河道内大規模堆積土砂の下流への輸送シミュレーション, 砂防学会・令和6年度北海道大会, 2024年5月16日（和歌山）
- [5] Marlon Arce-Acuña, 青木尊之, Shima Hironao, Maya Yoshida, River simulation with 1-m mesh resolution on a wide-area with bed and suspended load transport, 日本計算工学会・第29回計算工学講演会, 2024年6月12日（神戸）（予定）

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他（特許, プレスリリース, 著書等）

なし