

jh230013

青木尊之 (東京工業大学 学術国際情報センター)

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



研究背景と目的

近年、豪雨や台風などによる河川氾濫が急増している。気象予報に対しては数値予報や観測等のさまざまな方面から注力されているが、河川に対する警戒は取り組みが非常に遅れている。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況も全く異なる。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がどうしても必要となる。

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。河川は上流域では谷を流れ、それらの支川が合流することを繰り返して太い河川になる。川幅は1メートルから1km程度のものであり、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河川の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。

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旨とする。2023年度は、10km~20km四方の実地形内の河川に対し、水の流れだけでなく粒径分布を持つ砂礫の輸送と河床変動まで計算するシミュレーション・コードを開発し、リアルタイムにシミュレーションすることを旨とする。

計算手法

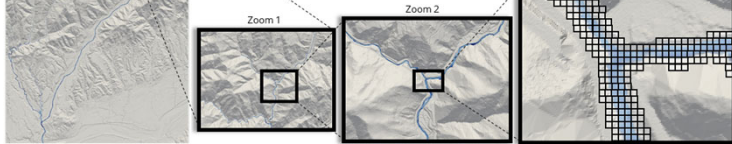
水の流れに対しては2次元浅水方程式を有限体積法で離散化して解く。Local Lax-Friedrichs法とHLLC法をRiemann Solverとして用い、移流項には3次のMUSCLスキームを用いてアンダーシュートを抑えることで計算の安定化を図り、時間積分には3段TVDルンゲクッタ法を用いる。浅水方程式の右辺には河床からの摩擦力としてManning力と、河床勾配による加速度項を含む。水際(水が流れている領域(水道)と流れていない領域の境目)は浅水方程式の特異点であるため、それを回避するために非常に薄い(1cm以下)水の膜を水が流れていない領域にも設定する Thin Film Techniqueを導入し、解析解と十分な精度で一致していることを確認した。浮遊砂と掃流砂の輸送を計算し、河床変動と連成する。

計算格子とGPU計算

河川では水量が増えることにより川幅が広がったり逆のことが起こったりする。そこで水際に格子を適合させるのではなく、水道が自由に変わるように直交格子を用い、水際に格子を自由に横断できる計算手法を用いる。河川は非常に限られたエリアを流れるため、全域に均一格子を割り当てて計算することは極めて非効率である。そこでAMR法のように階層的に格子を細分化する方法を検討したが、河川の計算を行うのは最細1m格子のリーフだけである。そこで、計算領域を仮想的に1mの等間隔格子で分割し、河川の計算を行う範囲にだけ1m格子を割り振る Narrow Band法を用いる。河川が氾濫するような場合には、格子を動的に追加する。

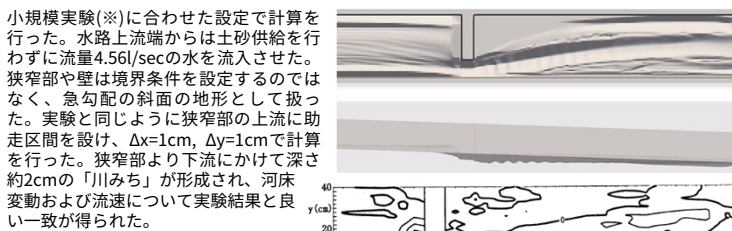
東京大学情報基盤センターの NVIDIA A100 を搭載するGPUスパコンWisteria-A を利用する。CUDAでGPU計算のコードを実装する。河川の計算に対しては単精度実数で十分である。また、GPUメモリに対してCoalescedアクセスとなるように、1m

格子の4x4、8x8または16x16ブロックを用いる。複数GPUに対しては、再分割の頻度が低いため、METISによるグラフ分割を利用した領域分割を行う。



検証計算

流入流量: 4.56 l/sec
河床材料: 単一粒径 7.46mm



小規模実験(※)に合わせた設定で計算を行った。水路上流端からは土砂供給を行わずに流量4.56l/secの水を流入させた。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た。実験と同じように狭窄部の上流に助走区間を設け、 $\Delta x=1cm$, $\Delta y=1cm$ で計算を行った。狭窄部より下流にかけて深さ約2cmの「川みち」が形成され、河床変動および流速について実験結果と良い一致が得られた。

※ 永瀬・道上・楢谷: 狭窄部を持つ山地河川の河床変動計算, 水工学論文集, 第40巻, 1996

研究の意義

現在、国土交通省からは土砂・洪水氾濫に対してハザードマップが示され、気象庁からは直近の降水量と河川の限定された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。しかし、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リアルタイム予測を目的としていない計算で、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程度の格子などで計算することが殆どで広域の2次元計算は全く行われていない。本研究は、広域の河川を1m格子でシミュレーションを行い、それに基づいてリアルタイムに氾濫予測を行うことを目的としており、従来の取組とは比較にならない画期的なものである。



研究グループ

- 代表者 青木 尊之 (東京工業大学)
- 副代表者 嶋 大尚 (砂防・地すべり技術センター)
- 共同研究者 吉田 真也 (砂防・地すべり技術センター)
- 共同研究者 Marlon Arce Acuna (東京工業大学)
- 共同研究者 大西 領 (東京工業大学)
- 共同研究者 松下 真太郎 (東京工業大学)
- 共同研究者 Yos Sitompul (東京工業大学)
- 共同研究者 長崎 孝夫 (東京工業大学)
- 共同研究者 Shen Dawei (東京工業大学)
- 共同研究者 インイクイ (東京工業大学)
- 共同研究者 TAN HONG GUAN (東京工業大学)
- 共同研究者 LIAN Tongda (東京工業大学)
- 共同研究者 玉木 幹太 (東京工業大学)
- 共同研究者 瀧 優太 (東京工業大学)
- 共同研究者 内田 遥己 (東京工業大学)
- 共同研究者 北川 翔 (東京工業大学)
- 共同研究者 下畑 和希 (東京工業大学)

今年度の計算対象

神戸市東灘区 住吉川流域 1938(昭和13)年7月に3日間降り続いた豪雨による濁流や土石流が街を襲い、600人を超える人が犠牲となる「阪神大水害」が発生



河床変動

z_b : 河床位
 λ : porosity of bed material ~0.4

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \sum_i \left(\frac{\partial q_{bx,i}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by,i}}{\partial y} + q_{su,i} - W_{f,i} C_{b,i} \right) = 0$$

掃流砂量 (芦田・道上の式) $q_{b,i} = \sqrt{sgd_i^3} \left\{ 17\tau_{*,i}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*,i}}{\tau_{*,i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*,i}}{\tau_{*,i}}} \right) \right\} P_i$

掃流砂輸送 $q_{bx,i}$ $q_{by,i}$ $q_{su,i}$ $W_{f,i} C_{b,i}$

砂礫の水中比重: $s = \frac{\sigma}{\rho} - 1$
 ρ : 水の密度 σ : 砂の密度
 エネルギー勾配: $I_e = \frac{(u^2 + v^2) \cdot n^2}{h^{4/3}}$

d_i : i番目の粒子径 P_i : 河床材料の粒径 i の割合
 無次元掃流力: $\tau_{*,i} = u_*^2 / sgd_i$ u_* : 摩擦速度: $u_* = \sqrt{ghI_e}$

浮遊砂量式

$$\frac{\partial hC_i}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial(C_i u_h)}{\partial x} + \frac{\partial(C_i v_h)}{\partial y} \right\} = q_{su,i} - W_{f,i} C_{b,i} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) \right\}$$

$C_{b,i} = \frac{W_{f,i} h}{D_h \left\{ 1 - \exp \left(-W_{f,i} h / D_h \right) \right\}} C_i$ $D_h = \frac{1}{6} \kappa u_*$ $\kappa = 0.41$

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

$q_{su,i}$: 単位時間・単位面積当たりの浮遊砂浮上量
 $W_{f,i}$: 浮遊砂の沈降速度
 $C_{b,i}$: 底面近傍の浮遊砂濃度