

広範な都市浸水現象を対象とした 連成モデルによる数値解析

永野 雄一^{*1}・Gabriel Barajas^{*2}・織田 幸伸^{*1}

Keywords : coupled model, flood, GPU, Navier-Stokes equations, OpenFOAM, shallow water equations

連成モデル, 浸水, GPU, ナビエストークス方程式, OpenFOAM, 浅水方程式

1. はじめに

豪雨や津波の越波等による都市の浸水現象では、下水道や建物、また堤防等によってその流れは複雑なものとなりやすい。しかしながら、浸水はしばしば広範囲に渡るため、流れのすべてを3次元（以下3D）で解くのは現実的ではなく、1次元（以下1D）や平面2次元（以下2D）といったより簡易な流れの式との連成解析を用いることが有効であると考えられる。

豪雨による浸水解析では、地表面のみでなく、下水道や河川における流れも取り扱う必要がある。解析高速化のため、近年急速な性能向上が見られるGPU¹⁾の活用事例が増えており、Echeverribarら²⁾は、CPU上で河川（1D）流を、GPU上で地表面（2D）流を解く1D-2D連成モデルを作成し、CPU（1コア）だけを使用した解析に比べ約20倍高速化した。またButtinger-Kreuzhuberら³⁾およびLuanら⁴⁾は、CPUで下水（1D）流を、GPUで地表面（2D）流を解くモデルを構築した。

しかしこれらのCPUとGPUのハイブリッドによる1D-2D連成モデル（以下ハイブリッドモデル）は、1D部分と2D部分間の流量を解析するためにCPUとGPU間でデータ交換を必要とし、この通信が高速化においてボトルネックとなる可能性がある²⁾。また、1D部分のCPUの並列化が行われておらず、1Dと2DをともにGPUで解く1D-2D連成モデル（以下フルGPUモデル）が作成された例も無いことから、最適なCPUとGPUの使用方法は未だに明らかになっていない。

津波による浸水の場合には、堤防での越波流れを解

く必要が生じるが、多くの場合鉛直方向も含む乱流を伴う流れとなるため3Dのナビエストークス方程式を解く必要がある。解析負荷低減のためには、3Dによる流れ解析は越波の生じる堤防付近にとどめ、そのほかの波浪伝播領域はより簡易な手法で取り扱うことが考えられる。Paoloら⁵⁾は、海岸工学分野で適用例の多いOpenFOAMの気液二相のナビエストークス方程式を解くことができるソルバーのinterFoamを対象に、断面2DのinterFoamと3DのinterFoamを連成させ、波浪伝播部を2Dで、構造物周りを3Dで解くことで、解析精度を保ちつつ解析所要時間を低減した。またMintgenら⁶⁾は、平面2D浅水方程式と3DのinterFoamによるカップリングモデルとしてshallowInterFoamを作成している。浅水方程式を用いたMintgenら⁶⁾の手法は、2D領域で気液二相のinterFoamを用いるPaoloら⁵⁾の手法と異なり、気液界面におけるSpurious velocity等による波高の減衰⁷⁾が不要で、また波浪伝播部の海底地形の面的な空間分布を扱える。ただしMintgenら⁶⁾の手法では、浅水方程式の実装はCPUの実行を前提としたOpenFOAMライブラリ群に大きく依存しており、GPUでの実行には根本的なコード変更が必要となる⁸⁾。

これらの課題を踏まえて、本研究では以下の2つの目的を設定した。

1. 豪雨による浸水に対して、フルGPUモデルを作成しハイブリッドモデルとの解析速度比較を行い、リアルタイム浸水予測への適用性を検証すること
2. 越波による浸水に対して、波浪伝播部分をGPUにより平面2D浅水方程式で解き、越波部分を3Dの

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

*2 IHCantabria, University of Cantabria, Spain

interFoam で解く連成モデル（以下 2D-3D 連成モデル）を作成し、すべてを interFoam により 3D で解いた場合との解析精度と解析速度を比較すること

2. 研究手法

2.1 基礎方程式

2.1.1 1D 浅水方程式

本研究で用いた 1D 浅水方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \begin{pmatrix} A \\ uA \end{pmatrix} & \mathbf{E} &= \begin{pmatrix} uA \\ Au^2 + gF_h \end{pmatrix} \\ \mathbf{S} &= \begin{pmatrix} 0 \\ -gA \left(-\frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^3} \right) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ここで、 u ：流速、 R ：径深、 A ：断面流量面積、 F_h ：静水圧項、 z_b ：底面高、 Q ：流量、 n ：マニングの粗度係数、 g ：重力加速度である。常流場と射流場の切り替えを正しくとらえるために、数値解法として Roe 平均に基づく流速差分離法⁹⁾を用い、数値流束のエントロピー補正には van Leer らによる補正式¹⁰⁾を適用した。時間解法には Euler 陽解法を用いた。また、満管状態における圧力流れは管頂上部に設定したプライスマンスロットにより扱った¹¹⁾。

2.1.2 2D 浅水方程式

本研究で用いた 2D 浅水方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix} & \mathbf{E} &= \begin{pmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \\ uvh \end{pmatrix} & \mathbf{F} &= \begin{pmatrix} uh \\ uvh \\ u^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \end{pmatrix} \\ \mathbf{S} &= \begin{pmatrix} 0 \\ -gh \left(-\frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} \right) + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ -gh \left(-\frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} \right) + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ここで、 t ：時間、 h ：水深、 u ： x 方向流速、 v ： y 方向流速、 z_b ：底面高、 n ：マニングの粗度係数、 g ：重力加速度、 v_t ：渦動粘性係数である。数値解法は 1D の場

合と同様の手法を採用した。なお、ソース項 \mathbf{S} の第二項の粘性項は 1D-2D 連成解析では考慮していない。

2.1.3 3D ナビエストークス方程式

3D 解析には、OpenFOAM (v2406) の Volume of Fluid (VoF) 法に基づく気液二相解析が可能なソルバーである interFoam を用いた。基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla \cdot p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha) \mathbf{u}_r) = 0 \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{u} ：流速、 t ：時間、 p ：圧力、 ρ ：密度、 \mathbf{g} ：重力加速度、 μ ：粘性係数、 σ ：表面張力係数、 κ ：曲率、 α ：VoF 値（各メッシュ内の水の割合）、 \mathbf{u}_r ：液相と気相の相対速度である。乱流モデルとして、非定常解析で実績がある¹²⁾k-ω SST モデルを用いた。k-ω SST モデルは壁面近傍流れに適した k-ω モデルと、完全乱流領域に適した k-ε モデルとの組み合わせモデルであり、モデル定数は Menter ら¹³⁾に準じた。

2.2 連成手法

2.2.1 1D-2D 間の連成

1D（管内）と 2D（地表面）間の水の行き来は、マンホールから地表面への溢水量（流入の時は負値）を示す以下の式³⁾に基づいて解析した。

$$Q_{1D2D} = KL(H_{1D} - H_{2D})\sqrt{g|H_{1D} - H_{2D}|} \quad (6)$$

ここで、 Q_{1D2D} ：下水管と地表面間の流量、 K ：流量係数、 L ：マンホール周長、 H_{1D} ：マンホール内水位、 H_{2D} ：地表面水位、 g ：重力加速度である。

2.2.2 2D-3D 間の連成

2D 領域と 3D 領域の間はそれぞれの領域に対する境界条件を与えることにより接続した。2D と 3D の間でやり取りされる物理量は水深 h と流速ベクトル \mathbf{u} とした。流速については x 、 y 方向で共通の処理を行うためここでは x 方向の流速 u についてのみ説明する。Mintgen ら⁶⁾と同様に、2D 領域と 3D 領域でフルード数 F_r を算出し、射流の場合 ($1 < F_r$) には流れ方向にのみ一方通行で物理量が伝達されるものとし、常流 ($F_r \leq 1$) の場合には両方の物理量の線形補間値を境界条件とした。なお、3D 領域におけるフルード数は断面平均流速を計算することを求めた。

表-1、表-2 に、射流時と常流時の 2D 領域と 3D 領域の境界条件をそれぞれ示す。ここで、 h_{2D} ：2D 境界部水深、 u_{2D} ：2D 境界部流速、 α_{3D} ：3D 境界部水深、

表-1 2D 領域と 3D 領域の境界条件（射流時）
Table 1 Boundary conditions between 2D and 3D
(supercritical)

Flow direction	2D	3D
2D → 3D	$\frac{\partial h_{2D}}{\partial x} = 0$	$\alpha_{3D} = f_\alpha(h_{2D})$
	$\frac{\partial u_{2D}}{\partial x} = 0$	$u_{3D} = u_{2D}$
3D → 2D	$h_{2D} = h_{3D}$	$\frac{\partial \alpha_{3D}}{\partial x} = 0$
	$v_{2D} = \bar{u}_{3D}$	$\frac{\partial u_{3D}}{\partial x} = 0$

表-2 2D 領域と 3D 領域の境界条件（常流時）
Table 2 Boundary conditions between 2D and 3D
(subcritical)

Flow direction	2D	3D
2D ↔ 3D	$h_{2D} = h_{mix}$	$\alpha_{3D} = f_\alpha(h_{mix})$
	$u_{2D} = u_{mix}$	$u_{3D} = u_{mix}$

u_{3D} : 3D 境界部流速であり、その他の変数は以下のように定義した。

$$h_{3D} = \sum \alpha_{3D} \Delta z \quad (7)$$

$$\bar{u}_{3D} = \frac{\sum \alpha_{3D} \Delta z u_{3D}}{h_{3D}} \quad (8)$$

$$h_{mix} = \frac{d_{3D} h_{2D} + d_{2D} h_{3D}}{d_{2D} + d_{3D}} \quad (9)$$

$$u_{mix} = \frac{d_{3D} u_{2D} + d_{2D} \bar{u}_{3D}}{d_{2D} + d_{3D}} \quad (10)$$

ここで、 Δz : 3D セルの鉛直方向の大きさ、 d_{2D} : 2D セル中心から境界部までの距離、 d_{3D} : 3D セル中心から境界部までの距離である。また関数 f_α は水深から VoF 値への変換関数であり、次の式により定義した。

$$f_\alpha(h) = \begin{cases} 0 & (h \leq z_{min}) \\ \frac{h - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} & (z_{min} < h < z_{max}) \\ 1 & (z_{max} \leq h) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 z_{min} : セルフェイス下端の底面からの高さ、 z_{max} : セルフェイス上端の底面からの高さである。なお参考として、Mintgen ら⁶⁾は 2D の一様な鉛直方向の流速に鉛直方向の分布をつけて 3D に与えることを提案しているが、本研究における解析では計算不安定を生じたため採用は見送った。またこの流速の鉛直分布に

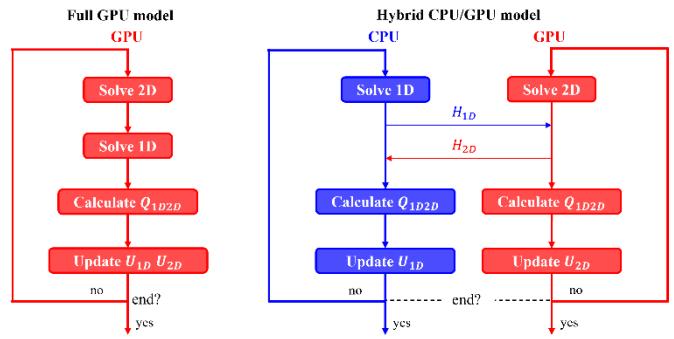


図-1 1D-2D 連成解析におけるフル GPU モデルとハイブリッドモデルの解析フロー

Fig. 1 Calculation flow of the full GPU model and the hybrid model for a 1D-2D coupled analysis

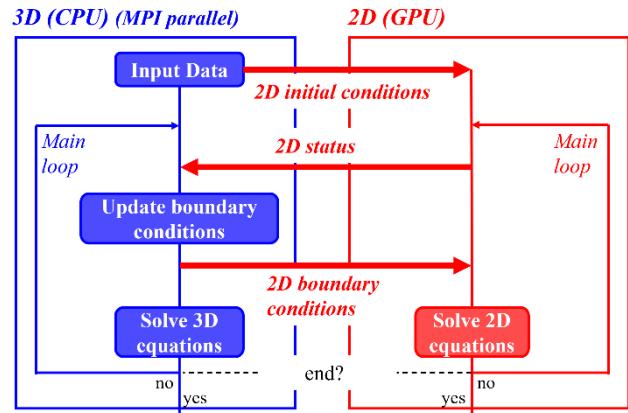


図-2 2D-3D 連成モデルにおける解析フロー
Fig. 2 Calculation flow of the 2D-3D coupled model

関連して、乱流エネルギー k 、比散逸率 ω を摩擦速度から算出する手法も Mintgen ら⁶⁾は提案しているが、これらも適用せず、3D 領域から 2D 領域への流出時にはゼロ勾配境界 ($\partial k / \partial x = 0$, $\partial \omega / \partial x = 0$) とし、2D 領域からの流入時にはそれぞれ定数値として 0.004, 0.3 を与えた。

2.3 解析フロー

2.3.1 1D-2D 連成解析

図-1 に、フル GPU モデルおよびハイブリッドモデルにおける解析フローを示す。さらに、速度比較を目的として、1D および 2D 部分を CPU で処理するモデル（以下フル CPU モデル）も作成した。フル CPU モデルにおける解析フローは図-1 に示すフル GPU モデルの解析フローと同様である。図-1 に示すように、ハイブリッドモデルでは、下水管と地表面間の流量 Q_{1D2D} を求めるために、 H_{1D} および H_{2D} が CPU と GPU 間で交換される。ハイブリッドモデルでは CPU と GPU を用いて 1D および 2D の浅水方程式を並列して解くことができるが、このデータ通信が解析速度のボトルネックになる可能性がある²⁾。フル CPU モデルとハイブリッドモデルの CPU 部分は C++で実装され、MPI (OpenMPI) によっ

て並列化した。モデルの GPU 部分には CUDA C++ を採用した。計算環境として、CPU に Ryzen 9 5950X (16 コア), GPU に GeForce RTX3080 を用いた。すべての 1D-2D 連成解析は単精度 (FP32) で実行した。

2.3.2 2D-3D 連成解析

図-2 に、2D-3D 連成モデルにおける解析フローを示す。既存の 3D モデル部分 (interFoam) は C++ で書かれ CPU によって動作し、MPI (OpenMPI) によって並列化されている。本研究では既存の 3D コードに GPU とのデータ通信を行うコード、また 2.2.2 項で示した境界条件算出のためのコードを追記した。2D モデル部分 (浅水方程式) は概ね図-1 に示したフル GPU モデルの 2D 部分に式(2)の粘性項を追加したものとなっており、同様に CUDA C++ で実装されており GPU で動作する。

まず初めに CPU で解析設定ファイル等を読み込み、2D 側のデータを GPU に転送することで 3D 側、2D 側それぞれで初期化処理が行われる。続いてメインループ内では 2D 側の最新の流速と水深を CPU に転送し、3D 側、2D 側の最新の状態をもとに 2.2.2 項で示した境界条件算出法に基づき境界条件が決定され、この境界条件を GPU に返送する。最後にこれらの境界条件に基づいて CPU と GPU でそれぞれ 3D ナビエストークス方程式、2D 浅水方程式が解かれる。

なお計算ループにおいて、2D 解析と 3D 解析それぞれでクーラン数がステップ毎に算出され、これらのクーラン数のうち大きいほうのクーラン数によって、次ステップのタイムステップを算出し、2D と 3D で共通のタイムステップで解析を実行した。

計算環境として、CPU に Xeon Gold 6248R (24 コア), GPU に Nvidia RTX A6000 を用いた。2D 解析は単精度で実行した。3D 解析においても単精度解析は最大 2 倍程度の高速化をもたらしうるが、同時に解析の収束性が大幅に悪くなるケースもあると報告されており¹⁴⁾、本研究では 3D 解析は倍精度 (FP64) で実施した。一方で OpenFOAM には単精度と倍精度を混合した Mixed precision での解析機能も備わっており¹⁴⁾、今後利用可能性の検証を行う予定である。

2.4 1D-2D 連成解析の検証

2.4.1 ベンチマーク解析

1D および 2D のセル数を様々に変化させた解析領域において、フル GPU モデル、フル CPU モデル、そして CPU と GPU のハイブリッドモデル (1CPU コアと 16CPU コアの 2 ケース) で流れの解析を実施して、それぞれのモデルの解析速度の比較を行った。下水管の数は 10^1 本、 10^2 本、 10^3 本、および 10^4 本とし、それぞ

れの下水管は 1 メートルのセルに分割された。地表面セルの数は 10^4 , 10^5 , 10^6 , および 10^7 とした。すなわちケースの総数は 16 (4 通り × 4 通り) である。すべての領域のサイズは X = 1,000 m および Y = 1,000 m とした。図-3 は解析領域の例を示している。図-3 に示す通り、初期水位を中心付近は 0.5 m、その周辺は 0.2 m として、ダムブレイク解析を行い、解析は全ケースにおいてそれぞれ 1,000 タイムステップ分実施した。

2.4.2 阿佐ヶ谷におけるリアルタイム浸水解析

図-4 に示す阿佐ヶ谷駅を含む都市排水区におけるリアルタイム浸水予測の実行可能性を検証した。この排水区では 2018 年 8 月 27 日にいわゆるゲリラ豪雨と呼ばれる局地的大雨によって内水氾濫が発生した。地表面の標高データと建物データは国土交通省から取得し、下水道データと浸水実績図は東京都から入手した。なお、浸水実績図は調査の実施場所に限られており、実際の浸水範囲全体を網羅出来ていない可能性がある。1D と 2D のセルサイズは共に 1.0 m とし、それぞれのセル数は 40,451 および 1,497,486 であった。

図-5 にはリアルタイム浸水予測の流れを示した。降雨予測データとして高解像度降水ナウキャスト¹⁵⁾を使用した。ナウキャストは 250 m の空間分解能を持つ 5 分毎の雨量の 30 分のデータであり、5 分ごとに新たに配信される。最初の解析は 19:30 に開始し、降雨観測データ (XRAIN¹⁶⁾) を 5 分間の助走計算 (19:25 - 19:30) に使用した。次の解析は最初の解析における 19:30 時点の助走計算結果を初期条件として、5 分後の 19:35 に実施した。すなわち各解析では、実時間 35 分間の洪水シミュレーションを 5 分以内で完了する必要があり、このようにして 20:30 まで 5 分ごとに解析を繰り返した。

2.5 2D-3D 連成解析の検証

図-6 に、津波による浸水を対象とした 2D-3D 検証解析の初期条件を示す。海側の初期水深は 3 m として、x 方向左端から 9 m までの領域に水深 6 m の水塊を設定し、これが崩れることによるダムブレイク流れを解いた。2D-3D 連成解析では 2D 領域におけるダムブレイクにより発生した流れが海側中央付近に位置する 3D 領域へと伝わり、一旦 2D 領域に戻ったあと再び 3D 領域に入り越波した後に、再び堤内地に存在する 2D 領域に戻り x 方向右端から計算領域外へ流出する。また、計算結果の妥当性の検証のために全領域を interFoam により 3D で解析を行い図-6 の点 A における水深と流速の推移について 2D-3D 連成モデルによる結果と比較を行った。さらに、両者の解析所要時間の比較も実施し、2D-3D 連成解析による高速化効果についても検証した。

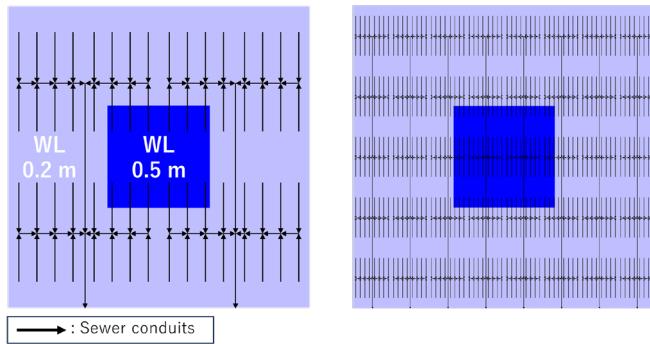


図-3 1D-2D 連成モデルのベンチマーク解析の初期条件および下水管配置例

Fig. 3 Initial conditions and sewer distribution for benchmark analysis of the 1D-2D coupled model

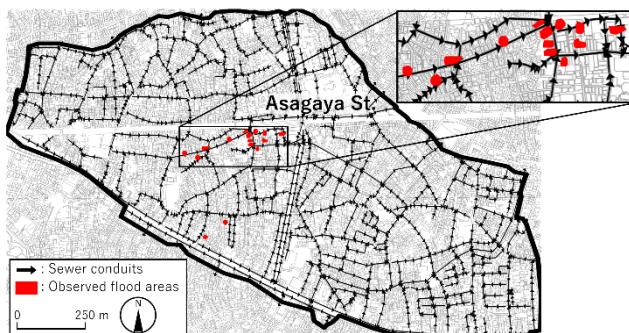


図-4 阿佐ヶ谷排水区

Fig. 4 Asagaya sewer drainage area

3. 研究結果

3.1 1D-2D 連成解析の検証

3.1.1 ベンチマーク解析

図-7(a)は、ハイブリッドモデル（16 CPU コア）のハイブリッドモデル（1 CPU コア）に対する高速化率を示しており、1D のメッシュ数が多くかつ 2D のメッシュ数が少ないほど、より速度が向上することを示している。これは、2D のメッシュ数が少ないとときに 1D の解析を行う CPU が総解析時間の大部分を占めるため、CPU の並列化の効果が出やすいからである。図-7(b)は、フル GPU モデルのハイブリッドモデル（16 CPU コア）に対する高速化率を示しており、図-7(a)と同様の傾向を示した。フル GPU モデルは、ハイブリッドモデルに比べて最大 7.2 倍の速度向上を達成した。図-7(c)は、フル GPU モデルのフル CPU モデル（1 CPU コア）に対する高速化率を示している。図-7(a)および図-7(b)とは異なり、1D および 2D のメッシュ数が増加するにつれて高速化率が増加し、最大で 130 倍の速度向上を示した。しかし、1D のメッシュ数が約 10^5 のとき、2D のメッシュ数が増加するにつれて速度向上効果が減少し、2D のメッシュ数が約 10^6 のときに極小値の 84.3 となつた。この原因については今後の検証課題としている。

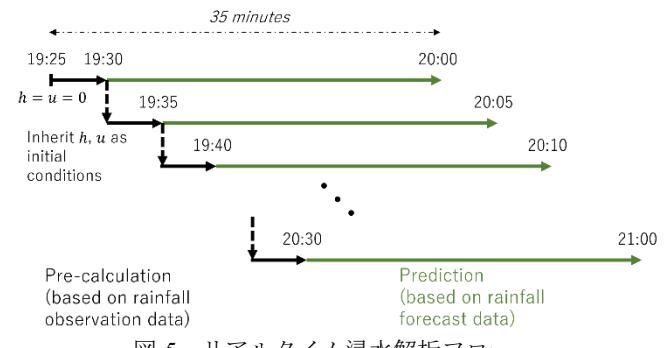


図-5 リアルタイム浸水解析フロー

Fig. 5 Overall scheme of the real-time flood prediction

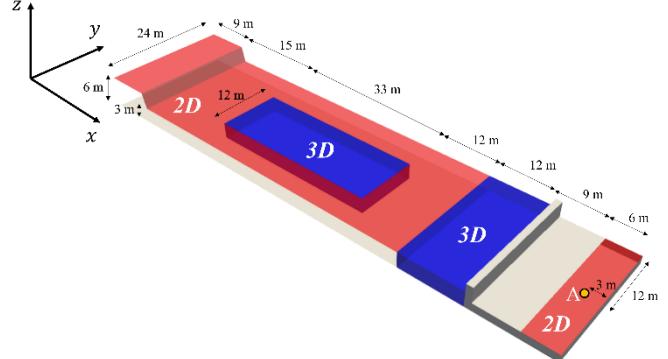


図-6 2D-3D 検証解析の初期条件

Fig. 6 Initial conditions for 2D-3D coupled model

3.1.2 阿佐ヶ谷におけるリアルタイム浸水解析

図-8 は、阿佐ヶ谷におけるフル GPU モデルとハイブリッドモデル（16 CPU コア）の解析所要時間の比較を示している。解析所要時間は解析の開始時刻によって変わり、これは解析中のタイムステップの変化によるものである。図-8 には、各解析における初期水量と累積降雨量の合計（以降 TWI: Total Water Input）も示した。一般に、TWI が増加するにつれて流速が増加しクーラン数を制限するためにタイムステップが短縮されるため、解析所要時間が長くなる。フル GPU モデルは、降雨予測データの 5 分間の配信間隔内にすべての解析を

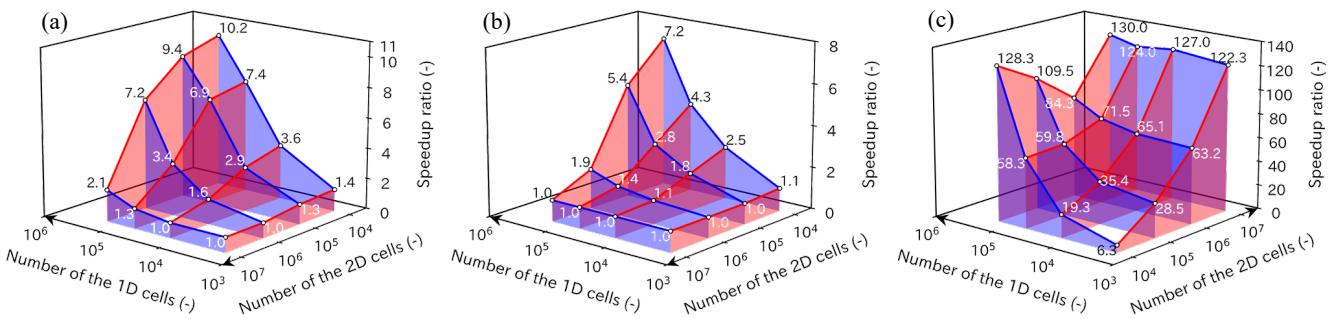


図-7 高速化率 (a) ハイブリッドモデル (16 CPU コア) vs ハイブリッドモデル (1 CPU コア)。 (b) フル GPU モデル vs ハイブリッドモデル(16 CPU コア) (c) フル GPU モデル vs フル CPU モデル(1 CPU コア)

Fig. 7 Speedup ratios. (a) The hybrid model (16 CPU cores) against the hybrid model (1 CPU core) (b) The full GPU model against the hybrid model (16 CPU cores) (c) The full GPU model against full CPU model (1 CPU core).

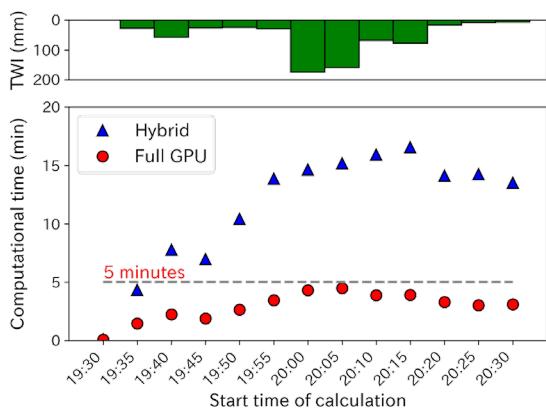


図-8 フル GPU モデルとハイブリッドモデルの 解析所要時間の比較

Fig. 8 Comparison of the computational time between the full GPU model and the hybrid model

完了したのに対し、ハイブリッドモデルは場合によっては約 15 分を要した。このことからフル GPU モデルのリアルタイム浸水予測におけるハイブリッドモデルに対する優位性が確認された。

図-9 に、解析期間中の各セルの最大水深と浸水実績図を比較する。19:45, 20:00, および 20:15 に開始された 3 つの解析について結果を示しており、浸水域の解析結果は概ね浸水実績範囲をカバーできていることがわかる。解析結果における浸水範囲は浸水実績範囲に比べて大きいが、これは 2.4.2 項でも述べた通り、浸水実績調査は調査範囲が限られているためと考えられる。

3.2 2D-3D 連成解析の検証

図-10に2D-3D連成モデルの検証のためのダムブレイク解析結果を示す。解析期間は15秒とした。ダムブレイク後の波の伝播の様子 ($t = 5.0$ s), 越波の様子 ($t = 12.0$ s), 越波後の堤内地での流れの様子 ($t = 14.0$ s) と越波後の堤防からの反射波の伝播の様子 ($t = 15.0$ s) を示しているが、2D-3D連成モデルの解析結果は概ね interFoamによる3Dの解析結果を再現できていることが分かる。

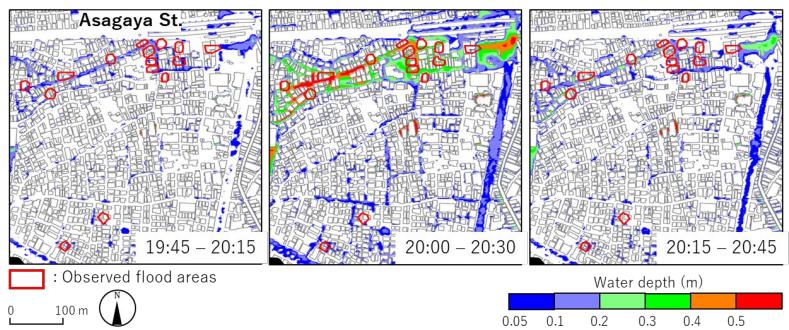


図-9 最大浸水深と浸水実績図の比較

Fig. 9 Maximum flood depth in each cell during the calculation period and the observed flood areas

図-11に、図-6の点Aにおける水深と流速の推移を示すが、水深と流速のどちらにおいても2D-3D連成モデルの結果はinterFoamの解析結果を概ね再現できていることがわかる。これらのことから2D-3D連成解析において3D解析における解析精度を概ね保つことができていると考えられる。

表-3に2D-3D 連成モデルと interFoam の解析所要時間の比較を示す。interFoam の解析所要時間は約 717 秒であり、2D-3D 連成モデルでは約 327 秒と interFoam の約 46 %の時間で解析を完了している。3D セルの数では interFoam が約 100 万個で 2D-3D 連成モデルは約 40 万個であり、 interFoam の約 40 %であったため、解析所要時間を概ね同じ割合で削減している。一方で 1 タイムステップ当たりの平均所要時間は interFoam で 0.650 s, 2D-3D 連成モデルで 0.189 s となっており、 interFoam の約 29 %となり、3D セルの削減割合以上の高速化となった。この理由として、2D 領域から 3D 領域へ伝わる流れは断面平均された整った流れとなるため、これによって圧力のポアソン方程式等の数値収束性が interFoam よりもよかつたためと考え

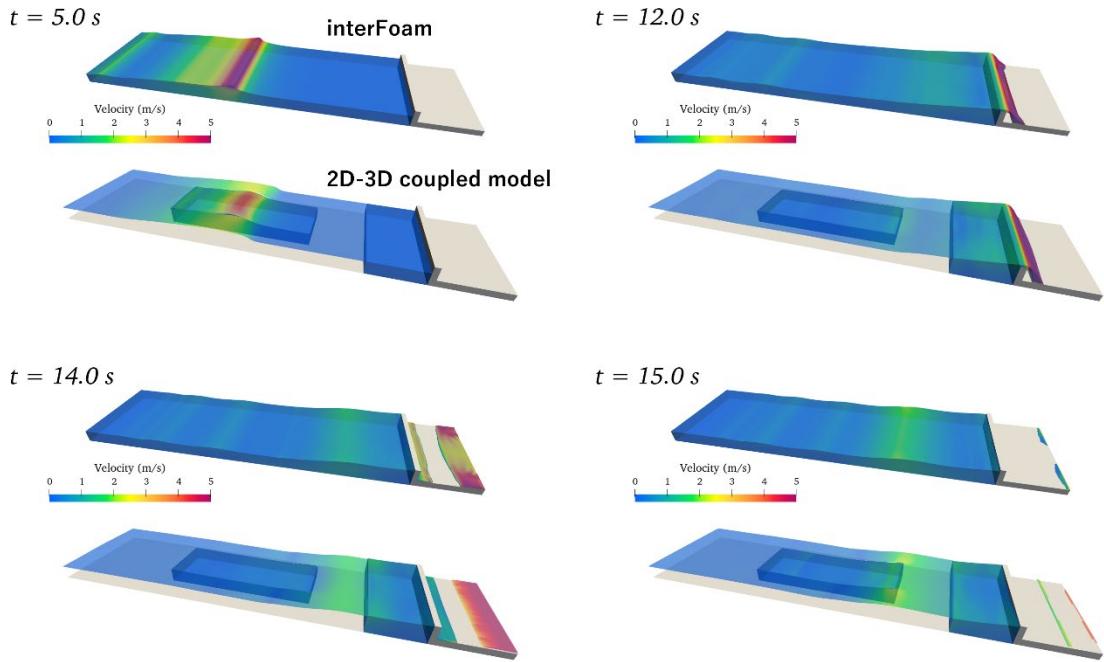


図-10 2D-3D 連成モデルの検証のためのダムブレイク解析結果（流速は 2D 部分では断面平均流速であるが、3D 部分では水面の流速を表す）

Fig. 10 Dam break analysis for the validation of the 2D-3D coupled model (“Velocity” means vertically averaged velocity in 2D part and surface velocity in 3D part, respectively)

られるが、未だ十分に検証できていない。

一方で、1 タイムステップの解析所要時間が interFoam の約 29 %であるのにも関わらず、全体の解析所要時間が約 46 %となっているのは、表-3 に示す通り、解析ステップ数が 2D-3D 連成モデルでは 1729 ステップと interFoam の 1103 ステップの約 1.6 倍となっているためである。

図-12 に 2D-3D 連成モデルと interFoam における解析期間中のタイムステップの比較を示すが、2D-3D 連成モデルでは interFoam と比較すると、越波が生じた $t = 12$ s 付近以外ではタイムステップが小さくなっている。これは以下の式に示す両モデルのクーラン数計算方法の違いに起因すると考えられる。

$$C_{2D} = \max\left(\frac{(v_{2D} + c)\Delta t}{\Delta l_{2D}}\right) \quad (12)$$

$$C_{3D} = \max\left(\frac{v_{3D}\Delta t}{\Delta l_{3D}}\right) \quad (13)$$

ここで、 v_{2D} : 2D セルにおける流速、 v_{3D} : 3D セルにおける流速、 Δl_{2D} : 2D セルにおけるセルサイズ、 Δl_{3D} : 3D セルにおけるセルサイズであり、波速 c は以下の式で表される。

$$c = \sqrt{gh_{2D}} \quad (14)$$

このように平面 2D 浅水方程式では流速に波速を加えた

特性速度をクーラン数の計算において使う必要があり、これによって波の伝播部分で 3D 解析よりもクーラン数が大きくなっていると考えられる。このため 2D-3D 連成モデルにおいて interFoam よりもタイムステップを小さくする必要があり、必要なタイムステップ数が増加した可能性がある。越波が生じた $t = 12$ s 付近では堤防付近で生じる大きい流速がクーラン数の決定に支配的となり、2D-3D 連成モデルと interFoam でタイムステップに大きな差が生じなかったと考えられる。

4. まとめ

下水道流れ（1D）と地表面流れ（2D）の両方を GPU で解析するためにフル GPU モデルを作成した。フル GPU モデルは、従来の CPU/GPU ハイブリッドモデルに比べて最大約 7 倍高速であることが確認された。フル GPU モデルを、阿佐ヶ谷の都市排水区に適用したところ、リアルタイム浸水予測に対して十分な解析速度と解析精度を持つことが示唆された。

平面 2D 浅水方程式と interFoam の 2D-3D 連成モデルを構築して、越波を含むダムブレイク解析に適用した。その結果、2D-3D 連成モデルで interFoam による 3D の解析結果を概ね再現でき、かつ解析所要時間も概ね半減することができた。

表-3 2D-3D 連成モデルと interFoam の解析所要時間の比較
Table 3 Comparison of computational time between 2D-3D coupled model and interFoam

	Number of 2D meshes (-)	Number of 3D meshes (-)	Total computational time (s)	Number of steps (-)	Average computational time per step (s)
interFoam	0	1,000,800	717.02	1103	0.650
Coupled model	25,600	400,800	327.32	1729	0.189

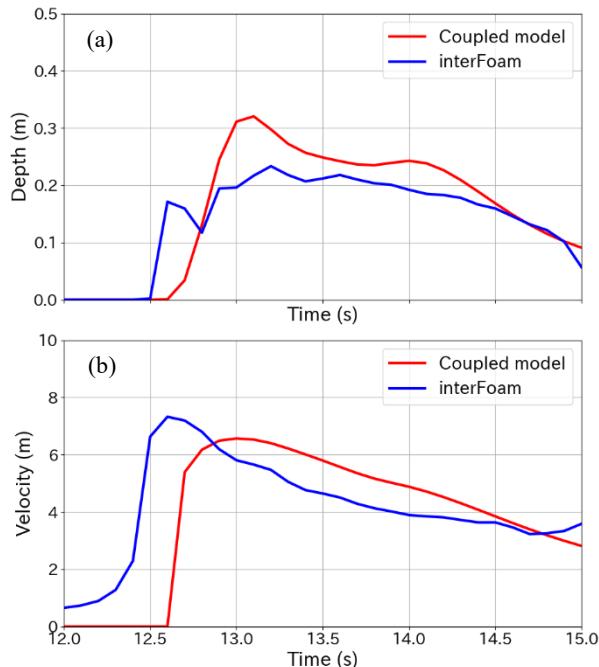


図-11 点 A (図-6 参照) における(a)水深と(b)流速の推移
Fig. 11 Timelapse of (a) water depth and (b) flow velocity at point A (see Fig. 6)

謝辞

利用した XRAIN データは、国土交通省より提供されたものである。

参考文献

- Dally, W. J., Keckler, S. W. and Kirk, D. B.: Evolution of the Graphics Processing Unit (GPU), *IEEE Micro*, Vol. 41, No. 6, pp. 42-51, 2021.
- Echeverribar I., Morales-Hernández M., Brufau P. and García-Navarro P.: Analysis of the performance of a hybrid CPU/GPU 1D2D coupled model for real flood cases, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 22 (5), pp.1198-1216, 2020.
- Buttinger-Kreuzhuber A., Konev A., Horváth Z., Cornel D., Schwerdorff I., Blöschl G. and Waser J.: An integrated GPU-accelerated modeling framework for high-resolution simulations of rural and urban flash floods, *Environmental Modelling and Software*, Vol. 156, 2022.
- Luan G., Hou J., Wang T., Li D., Zhou O., Liu L. and Duan C.: A 1D-2D dynamic bidirectional coupling model for high-resolution simulation of urban water environments based on GPU acceleration techniques, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 428, 2023.
- Paolo, B. D., Lara J. L., Barajas, G. and Losada, I. J.: Wave and structure interaction using multi-domain couplings for Navier-

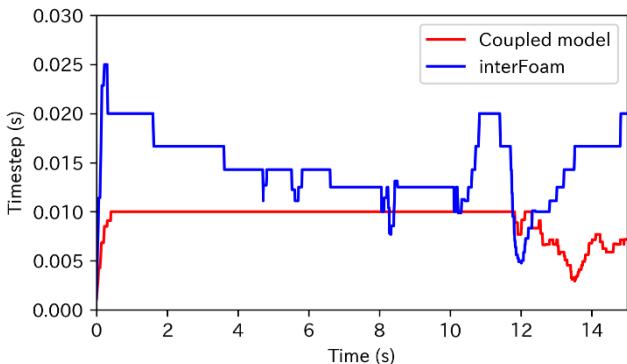


図-12 2D-3D 連成モデルと interFoam における解析期間中のタイムステップの比較
Fig. 12 Comparison of time steps during the analysis period between the 2D-3D coupled model and interFoam

Stokes solvers in OpenFOAM®. Part I: Implementation and validation, *Coastal Engineering*, Vol. 164, 103799, 2021.

- Mintgen, F. and Manhart, M.: A bi-directional coupling of 2D shallow water and 3D Reynolds-averaged Navier–Stokes models, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 56, Issue 6, pp. 771-785, 2018.
- Larsen, B. E., Fuhrman, D. R. and Roenby, J.: Performance of interFoam on the simulation of progressive waves, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 61, No. 3, pp. 380-400, 2019.
- Malenza, G.: Analysis of OpenFOAM performance obtained using modern C++ parallelization techniques, *Master's thesis, University of Turin*, 2022.
- Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, Issue 2, pp. 357-372, 1981.
- van Leer, B., Lee, W. T. and Powell, K. G.: Sonic-point capturing, *9th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, 1989.
- Chen, S., Zheng, F. and Liu, X: Augmented HLL Riemann solver including slope source term for 1D mixed pipe flows, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 23 (4), pp. 831-848, 2021.
- Higuera, P., Lara, J. L. and Losada, I. J.: Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM®, *Coastal Engineering*, Vol. 71, pp. 119-134, 2013.
- Menter, F., Kuntz, M. and Langtry, R.: Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, *Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, pp. 625-632, 2003.
- Brogi, F., Bnà S., Boga G., Amati G., Esposti Ongaro T. and Cerminara M.: On floating point precision in computational fluid dynamics using OpenFOAM, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 152, pp. 1-16, 2024.
- Kigawa S., Hayashi T. and Nishimura T.: Advanced weather radar application technology at JMA, *WMO/CIMO/TECO-2016*, Madrid, Spain, 27-29 September, 2016.
- 国土交通省 (MLIT): XRAIN XMP 合成雨量データ, https://metadata.diasjp.net/dmm/doc/MLIT_XRAIN_composite-DIAS-ja.html. (参照 2025-08-01) .