

渋谷駅東口エリアを対象とした GPU による浸水解析高速化の検証

大成建設(株) 技術センター 正会員 ○永野 雄一
 大成建設(株) 技術センター 正会員 高山 百合子
 大成建設(株) 技術センター 正会員 織田 幸伸

1. 目的

現在、ゲリラ豪雨(局地的大雨)予測の高度化が試みられているが、浸水対策のリードタイム確保のためには、浸水解析の高速化が必要となり、その手法として GPU の活用が考えられる。一般に都市の浸水解析は 2次元地表流解析と 1次元管内水理解析の連成解析となるが、これまでの GPU による高速化の多くは地表流解析のみに留まっている^{1),2)}。本研究の目的は、実市街地を対象に地表流解析と管内水理解析の連成解析を GPU で行い、高速化効果を評価していわゆるリアルタイム解析に活用可能かを検証することである。

2. 研究方法

対象領域とした渋谷駅の東口エリアの建物分布及び下水管渠分布を図1に示す。地表面は平面2次元構造格子とし、下水管渠は流れ方向のみを考慮した1次元のノード(マンホール)とリンク(管渠)として表現した。基礎方程式として地表流解析には2次元浅水方程式(式1)を、管内水理解析には1次元完全サンブナン式(式2)を用いた。両式とも有限差分法により解いた。また、地表面と管内の水の行き来は式3に示すマンホールから地表面への溢水量(流入の時は負値)の計算式に基づいて計算した。なお、管内水理解析において満管流れはプライスマンスロットモデルによって表現した。

解析には CPU として Xeon Gold 6240, GPU として Quadro RTX6000 を用いた。解析速度の性能を表1に示す。表1より両者とも倍精度性能よりも単精度性能のほうが高く、単精度性能において RTX6000 が大幅に Xeon を上回っていることが分かる。

3. 結果と考察

渋谷駅東口エリアにおける GPU による倍精度解析における浸水深分布の時間変化を図2に示す。計算期間は2時間とし、初め1時間は75mm/hでその後無降雨とした。また、図3に浸水深0.1m以上、0.3m以上の区域の面積の推移を示す。図2および図3より降雨が継続する計算開始60分までは浸水域が拡大していることが伺える。渋谷駅東口エリアは渋谷駅に向かって傾斜しており、解析領域の東側への降雨が西側へ流れてくる。そのため、明治通り沿いで浸水深がほかの箇所よりも大きくなっている。そして、無降雨とした計算開始60分以降は、下水道による排水によって浸水域は減少していくことが分かる。

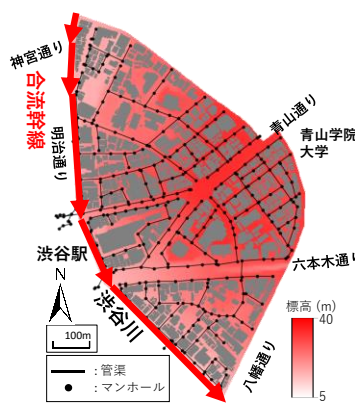


図1 解析領域

表1 解析速度性能

	Xeon Gold 6240	Quadro RTX6000
コア数	18	4608
倍精度性能 (TFLOPS)	0.75	0.51
単精度性能 (TFLOPS)	1.5	16.3

2次元浅水方程式

$$\text{連続式: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r + q$$

$$\text{運動方程式: } \begin{cases} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} & \dots \text{式1} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} \end{cases}$$

t : 時間(s), h : 水深(m), M : x 方向の流量フラックス(m^3/s), N : y 方向の流量フラックス(m^3/s), r : 降雨量(m/s), q : 溢水量(m^3/s), A : メッシュ面積(m^2), u : x 方向の流速(m/s), v : y 方向の流速(m/s), H : 水位(m), n : 粗度係数(-), g : 重力加速度(m/s^2)

1次元完全サンブナン式

$$\text{連続式: } \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\text{運動方程式: } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |Q|}{R^3} = 0 \quad \dots \text{式2}$$

t : 時間(s), A : 水断面面積(m^2), Q : 流量(m^3/s), x : 管渠長(m), H : 水位(m), g : 重力加速度(m/s^2), R : 径深(m), n : 粗度係数(-)

溢水量計算式

$$Q = KL(H_m - H) \sqrt{g |H_m - H|} \quad \dots \text{式3}$$

q : 溢水量 (m^3/s), K : 流量係数, L : マンホール周長(m), H_m : マンホール内水位(m), H : 地表面水位(m), g : 重力加速度(m/s^2)

キーワード 高速化, GPU, 局地的大雨, リアルタイム浸水解析, 浅水方程式

連絡先 〒160-0004 東京都新宿区四谷1丁目(外濠公園内) (公社)土木学会 全国大会係 TEL03-3355-3442

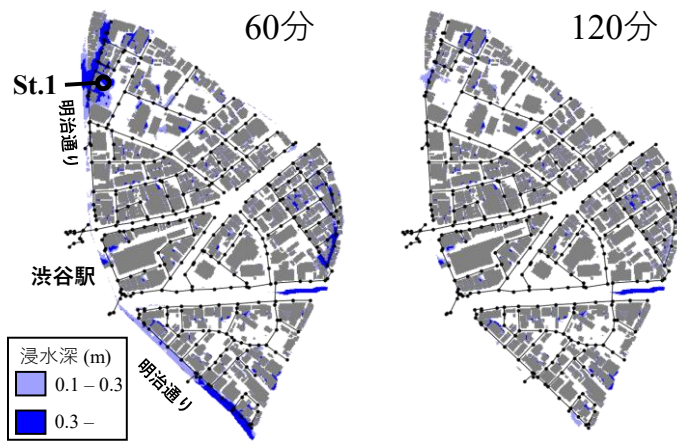


図2 浸水深分布の時間変化

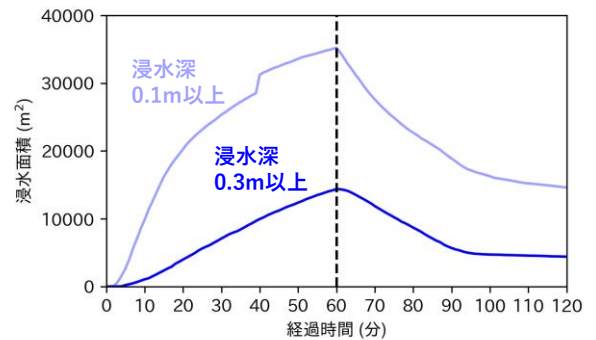


図3 浸水面積の推移

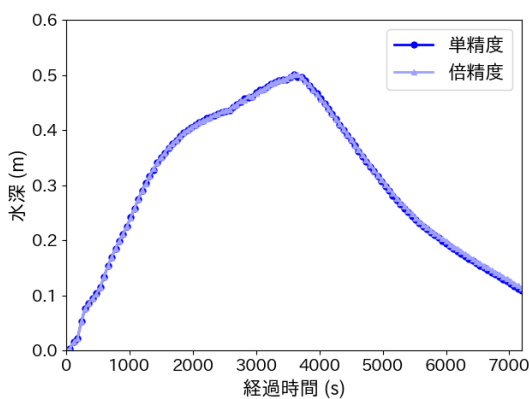


図4 St.1における浸水深推移

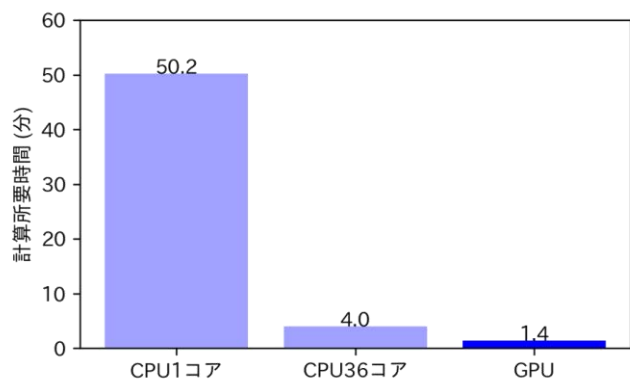


図5 CPUとGPUの解析速度の比較

図4に、図2のSt.1におけるGPUを用いた倍精度解析と単精度解析による浸水深の比較を示す。両演算の差の最大値は0.0025m、計算開始後2220秒であり、倍精度解析と単精度解析で浸水深にほとんど差が生じていないことが分かる。

図5に、CPUとGPUの解析速度の比較を示す。CPU、GPU共に単精度解析とした。CPU1コアの場合は計算完了までに50.2分、GPUの場合は1.4分かかっている。現状のゲリラ豪雨予報が高々30分前からしかできないことを考慮すると、CPU1コアの場合は降雨に遅れて20分ほど経ってから計算が完了することになる。図3より降雨開始から20分後には20000m²以上の広い範囲で浸水が発生しており、CPU1コアでは解析速度が不足していることがわかる。また、CPU2基36コアによるMPI並列の場合でもGPUの場合の約3倍の4.0分計算に要している。以上のように、GPUではより迅速に浸水予測を終えられるため、避難や止水等の対策をとるためのリードタイムを長く確保することができる。

4. まとめ

渋谷駅東口エリアにおいて、高速な単精度解析と倍精度解析の浸水深誤差は3mm未満となり、実務上十分な精度が保てることが分かった。また、CPU1コアの場合は計算完了までに50.2分、GPUの場合は1.4分と、GPUでは約40倍高速に解析可能であり、リアルタイム解析に利用可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) Echeverribar, I., et al.: 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.
- 2) Park, S., et al.: 2D GPU-accelerated high resolution numerical scheme for solving diffusive wave equations, *Water*, vol.11(7):1447, 2019.