

浸水解析におけるメッシュ数及び管渠数と GPU による高速化効果の関係評価

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 織田 幸伸

1. 目的

ゲリラ豪雨と呼ばれる局地的大雨の頻発化により，リアルタイム浸水解析が求められており，高速化の一つの手段として GPU の利用が考えられる．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（河道内）水理解析の連成解析であるが，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，地表流解析と管内水理解析の連成解析を GPU で行い，メッシュ数及び管渠数と GPU による高速化効果の関係を整理することである．

2. 研究方法

解析領域は図 1 に示すように 10000m×10000m の矩形領域とした．初期水位を図 1 のように中央の 3333m×3333m の領域では 0.5m，それ以外の区域では 0.2m として（G.L. 0.0m），ダムブレイクによる流れを解いた．端部四辺は壁境界（通過流量 0）とした．また，下水管渠を楕状に図 1 のように入力した．地表面は 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．両者の性能を表 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．本研究では GPU の単精度性能の高さに注目して，メッシュ数及び管渠数を変えた時の解析速度変化の評価とともに，解析結果の妥当性の検証も行った．

3. 結果と考察

まず図 2 にメッシュ数 10^6 個，管渠数 10^4 個の時の GPU による単精度解析における水深分布の時間変化を示す．また，図 3 に図 2 中の p1 と p2 における水深の時間変化を示す．水塊が周囲に広がるとともに中央の p1 では水深が減少し，p2 で水深が増加している．また，図 3 には GPU による単精度解析と倍精度解析の両方の計算結果を示しているが，両者はほぼ等しい値となっている．単精度解析における倍精度解析に対する誤差は p1 において最大でも $8.1 \times 10^{-4}\text{m}$ (0.17%)となり，単精度解析でも十分な解析精度が得られることが分かった．

キーワード 局地的大雨，浸水解析，GPGPU，単精度，2 次元浅水方程式，1 次元完全サンブナン式

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 （株）大成建設 技術センター T E L 080-9579-4356

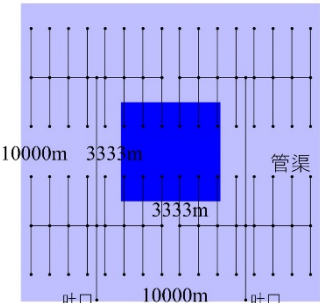


図 1 解析領域

表 1 CPU 及び GPU の性能

	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

連続式：
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

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

t: 時間(s), h: 水深(m), M: x方向の流量フラックス(m^2/s), N: y方向の流量フラックス(m^2/s), 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

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

運動方程式：
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |Q|}{R^4} = 0 \quad \dots \text{式2}$$

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

溢水量計算式

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

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

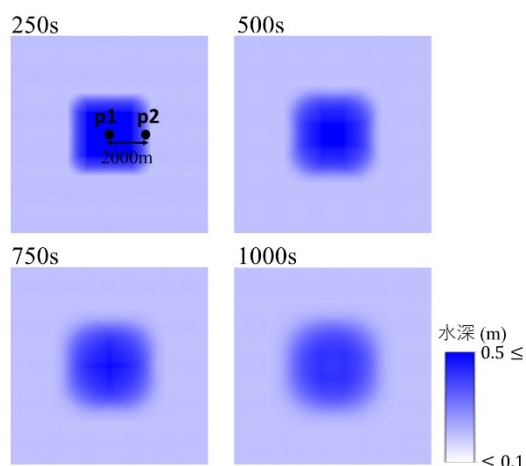


図2 水深分布の時間変化（管渠非表示）

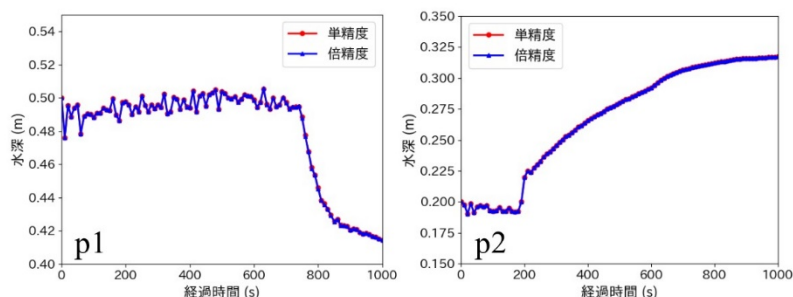


図3 p1 と p2 における水深の時間変化

次にメッシュ数及び管渠数と GPU による高速化の関係を図4に示す。横軸をメッシュ数と管渠数、縦軸を CPU1 コアに対する解析速度比とした。なお解析速度は、1000 ステップの解析を行うのに要した時間の逆数として求めた。また、解析は CPU と GPU 両方で単精度解析とした。

図4より概ね、管渠数が減少するほど、またメッシュ数が増加するほど CPU に対する GPU の高速化効果が大きくなっていることが分かる。これは、地表流解析はほぼ単純な行列計算と見なすことが出来るため GPU による解析に適しているためであると考えられる。一方管内水理解析は、二分探索による水量から水位の算出などの複雑な計算処理を含むために CPU のほうがより適していると考えられる。

メッシュ数 10^7 個、管渠数 10^3 個のときに CPU に対する高速化効果は最も大きく、解析速度は74.9倍となった。一方、メッシュ数 10^6 個、管渠数 10^5 個のときに最も小さく、解析速度は28.7倍となった。

4. まとめ

2次元地表流解析と1次元管内水理解析の連成解析を GPU で行い、メッシュ数及び管渠数と GPU による高速化の関係を整理した。その結果、単精度解析において概ね、管渠数が減少するほど、またメッシュ数が増加するほど CPU に対する GPU の高速化効果が大きくなっていることが分かるとともに、CPU1 コアに対して約30倍～約70倍高速に計算できることが分かった。また、浸水解析において、GPU の単精度解析の倍精度解析に対する誤差は最大でも1mm未満であり、実務上十分精度を保つことが出来ることが分かった。

倍精度性能が高い GPU は高価なサーバー用に限られるが、単精度性能は本解析で用いた CG 用や更に安価な家庭ゲーム用の GPU であっても CPU と比べて高い性能を有している。これらを有効活用することでリアルタイム浸水解析システムを安価に構築することが出来ることが示された。

参考文献

- 1) Echeverriar, 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.

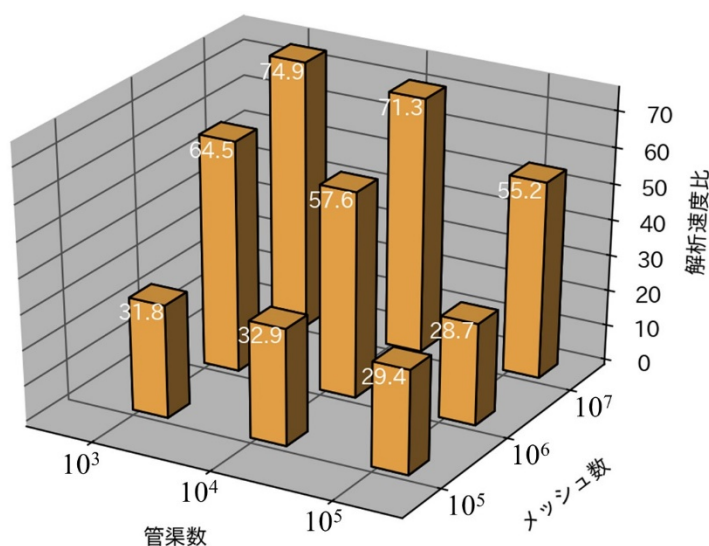


図4 メッシュ数及び管渠数と GPU による高速化の関係