

3次元並列 VOF 法に基づく大規模津波シミュレーションとその可視化

中央大学大学院 学生員 ○ 不室 太希
 東京大学 正会員 田中 聖三
 中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震により発生した津波は、沿岸地域に甚大な被害をもたらした。津波の挙動を事前に予測・把握して災害に備えることの重要性が改めて認識された。津波による構造物への被害を定量的に検討するためには、Navier-Stokes 方程式に基づく 3 次元解析が必要となる。しかし、3 次元の津波シミュレーションは非常に大規模な自由度を扱うことから、これを高速に処理するためには並列計算が必要となる。また、複雑な構造物形状を対象とするには、任意形状への適合性に優れた手法は有効となる。

そこで本研究では、基礎方程式として 3 次元 Navier-Stokes 方程式を、離散化手法としては安定化有限要素法¹⁾を用いた自由表面流れの並列計算手法の構築を行うことを目的とし、本手法の並列化効率を検証するとともに大規模津波シミュレーションへの適用を行った。さらに、シミュレーション結果の高品質な可視化についても検討した。なお、自由表面位置を捕捉するための手法には VOF 法²⁾を用い、並列計算には MPI³⁾を用いた。

2. 数値解析手法

(1) 支配方程式

非圧縮性粘性流体の流れを考え、流れ場の支配方程式は以下に示す Navier-Stokes 方程式 (1) と連続式 (2) で表される。

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここで、 u は流速、 p は圧力、 f は物体力を表している。各節点における密度 ρ および粘性係数 μ は VOF 関数 ϕ を用いて以下のように定義される。

$$\rho = \rho_l \phi + \rho_g (1 - \phi) \quad (3)$$

$$\mu = \mu_l \phi + \mu_g (1 - \phi) \quad (4)$$

ここで ρ_l 、 ρ_g 、 μ_l 、 μ_g は液体および気体の密度と粘性係数を表す。なお、VOF 関数 ϕ は液体上で 1.0、気体上で 0.0、界面では 0.5 をとるスカラー関数である。

また、VOF 関数の時間発展は、以下に示す移流方程式 (5) によって支配される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

(2) 離散化手法

支配方程式の空間方向の離散化には SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法を適用し、時間方向の離散化には Crank-Nicolson 法に基づく差分近似を適用する。なお、(1) の移流速度は Adams-Bashforce 法によって近似し、(5) 式の移流速度は流れ場の計算から求めたものを用いる。連立一次方程式の解法には GPBi-CG 法を用いる。

3. 並列計算手法

計算の高速化および大規模化を行うために、FlatMPI による並列計算手法を導入する。使用する計算機は、スーパーコンピュータ CRAY XE6 である。表 - 1 に計算機の性能を示す。これは共有-分散メモリ型の並列計算機であり、図 - 1 に示すように 1 ノードあたり 4 つの NUMA ノードで構成されている。NUMA 構成の計算機では 1 つのメモリへのアクセスコストが計算コアごとに均一でないことから、メモリアクセスを向上させるため、プロセスへのメモリの割り当ては NUMA ノード内に制限する。

4. 可視化手法⁴⁾

大規模津波シミュレーションにおける解析結果の可視化には、フォトリリスティックビジュアライゼーションソフトウェア (Lumion⁵⁾) を使用する。全計算ステップで共通となる地形データと、各ステップごとに異なる自由表面形状データを読み込み、自由表面形状データのレイヤー表示を連続的に切り替えることで津波が遡上する様子を再現する。また、自由表面の水面勾配によって白波の効果を加えるなどの処理を行うことで、より高品質な可視化を可能としている。

表 - 1 計算機の性能

CRAY XE6	
CPU	AMD Opteron 6238 (2.9GHz)
Memory size	64GB × 940nodes
Number of cores	16cores × 2CPUs × 940nodes
O.S.	SUSE Linux Enterprise Server 11
Compiler	Intel Composer XE2011

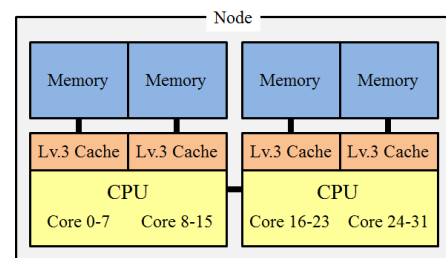


図 - 1 計算機のアーキテクチャ

KeyWords： 津波，並列計算，VOF 法，安定化有限要素法，可視化

連絡先： 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

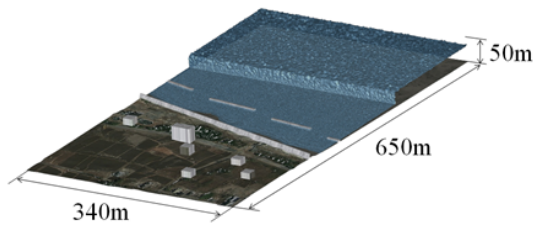


図-2 並列性能評価のための解析モデル

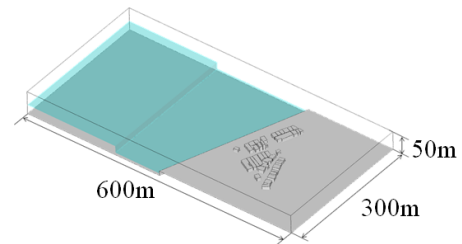


図-5 大規模シミュレーションのための解析モデル

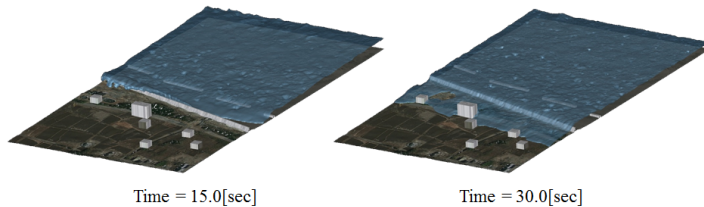


図-3 解析結果

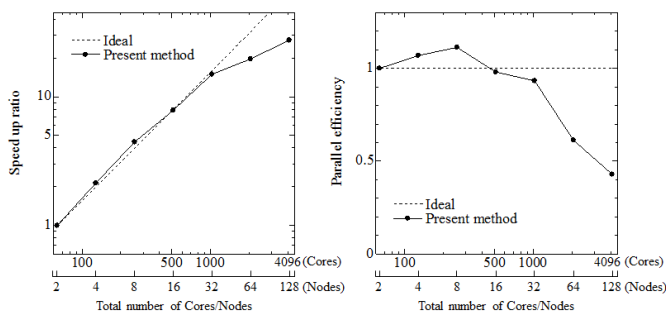


図-4 並列性能の評価

5. 数値解析例

(1) 並列性能の評価

本手法の並列性能の評価を行うため、図-2に示すモデルを用いて並列化効率の計測を行う。解析には四面体の非構造格子を用いる。節点数は6,738,732、要素数は37,560,556であり、最小メッシュ幅は地表面近傍で0.50mとする。微小時間増分量 Δt は0.050sとし、境界条件としてSlip条件を与える。

図-3に時刻15sおよび30sにおける解析結果を示す。津波が堤防を乗り越えて陸域に遡上していく様子をとらえていることが確認できる。図-4に使用コア数/ノード数とスピードアップおよび並列化効率の関係を示す。図中のプロットは、2ノード使用時を基準とした値である。これらの結果から、FlatMPIによる並列計算手法を導入することで、高いスピードアップおよび並列化効率を得られていることが確認できる。また、使用コア数1,024以下の範囲では、特に高い並列化効率を得られている。

(2) 大規模津波シミュレーション

本手法を大規模津波シミュレーションへ適用するため、図-5に示すモデルを用いた解析を行う。解析には四面体の非構造格子を用いる。節点数は23,233,249、要素数は125,280,464であり、最小メッシュ幅は地表面近傍で0.25mとする。微小時間増分量 Δt は0.050sとし、境界条件はSlip条件を与える。また、並列数は2,048とする。

図-6に時刻40sにおける解析結果の鳥瞰図および地表面近傍からの視点を示す。本手法によって津波が沿岸都市

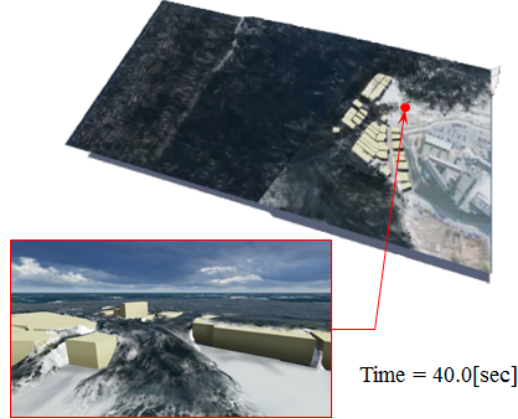


図-6 解析結果

域に侵入していく様子をとらえていることが分かる。また、4章で述べた可視化手法を導入することにより、高品質な可視化を実現することができた。

6. おわりに

本報告では、基礎方程式として3次元Navier-Stokes方程式を、離散化手法としては安定化有限要素法を用いた自由表面流れの並列計算手法の構築を行うことを目的とし、本手法の並列化効率を検証するとともに大規模津波シミュレーションへの適用を行った。数値解析例を通じて以下の結論を得た。

- 大規模津波シミュレーションにおいてFlatMPIによる並列計算手法を導入することで、高い並列化効率を得られた。
- フォトリリスティックビジュアライゼーションを導入することで、シミュレーション結果の高品質な可視化を実現することができた。

今後は、複雑形状を有する実地形モデルを用いた大規模津波シミュレーションを行っていく予定である。

参考文献

- 1) Tezduyar, T. E.: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advance in Applied Mechanics*, 28, pp.1-44, 1992.
- 2) Hirt, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39, pp.201-225, 1981.
- 3) Pacheco, P. S.: *Parallel Programming with MPI*, Morgan Kaufmann, 1997.
- 4) 奥野恭平, 樫山和男, 古牧大樹: 水環境シミュレーションのための可視化に関する研究, 土木学会関東支部第41回技術研究発表会, I-33, 2014.
- 5) <http://lumion3d.com/>