

建物群を含む地表面詳細モデルを用いた 粒子法による三次元津波遡上解析

江口 史門¹・浅井 光輝²・大谷 英之³・一色 正晴⁴

¹学生会員 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail: eguchi@doc.kyushu-u.ac.jp

²正会員 九州大学大学院准教授 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail: asai@doc.kyushu-u.ac.jp

³正会員 理化学研究所 計算科学研究機構 (〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町7-1-26)

E-mail: h.o-tani@riken.jp

⁴非会員 愛媛大学大学院講師 理工学研究科 電子情報工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: isshiki@cs.ehime-u.ac.jp

東北地方太平洋沖地震に伴う津波は沿岸地域に甚大な被害をもたらした。この津波災害を教訓とし、今後危惧されている巨大津波に対しての沿岸地域の防災、減災技術の再検討が急務である。安全な沿岸地域の形成には、構造設計等のハード防災だけでなく、防災教育・ハザードマップ作成などを通じたソフト防災も含めた両面から検討する必要がある。このような津波対策を合理的に実践するためには、精度の高い津波遡上解析に基づく構造・人的被害シミュレーションが必要である。第一歩として、本研究では地理情報システムGISより得られる建物の立体位置情報と数値標高データから、建物を含む地表面を詳細三次元解析モデルとして再現した。また解析手法として粒子法の1つであるSPH法を採用し、解析モデル作成から津波遡上解析を行うまでの一連のツールを構築した。さらに防災・減災への利活用を念頭に置いて、解析結果をフォトリアリスティックに可視化する手法の開発にも取り組んだ。

Key Words: 3D Tsunami run-up simulation, disaster prevention, disaster mitigation, particle method

1. 緒言

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波は太平洋沿岸地域に甚大な被害をもたらした。この津波災害を踏まえ、今後危惧されている巨大津波に対しての沿岸地域の防災、減災技術の再検討が急務である。安全な沿岸地域の形成には、堤防・津波に対しての構造設計等のハード防災だけでなく、同時に防災教育・ハザードマップ作成等のソフト防災も念頭に置き対策案を検討しなければならない。こうした津波対策を合理的に実践するためには、正確な津波遡上解析、またそれによる構造・人的被害シミュレーションの整備が必要であると考える。本研究では、国土地理院¹⁾の地理情報システム(以降GIS)より得られる建物の地理空間情報と地表標高情報から、建物を含む地表面を詳細な三次元解析モデルとして再現するツールを構築し、既往の研究で開発した大規模粒子法解析ツールにより津波遡上解析を実施した。また解析対象として南海トラフ地震を想定し、地震発生時に甚大な津波被害が予想される高知県高知市にお

いての津波遡上解析を実施した。またこの解析結果をもとに、本ツールの防災減災への活用法を検討した。

2. 解析手法

解析手法としてメッシュフリーな解法である粒子法の一つであるSPH法に着目し、非圧縮性流体用に開発されたISPH (Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いた。また、ISPH法の中でも圧力振動問題を解決するために、瞬間的に微圧縮を許容した解法である安定化ISPH法を採用した。なお、境界処理法としては非一様圧力ノイマン条件を満足させ、速度についても適切な境界条件を付与することができる仮想マーカーを用いた境界処理法²⁾を採用した。

(1) SPH法の基礎式

SPH法は粒子法の一つであり、圧縮性流体の解析手法として提案されたのちに、非圧縮性流体解析法(ISPH法)へと拡張された。まずSPH法では任意の空間点 \mathbf{x} におい

て定義される時刻 t でのスカラー関数 $\phi(\mathbf{x}, t)$ が、次式に示す積分形式として近似される。

$$\phi(\mathbf{x}, t) \approx \int_V W(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|, h) \phi(\mathbf{x}', t) dV \quad (1)$$

ここで、 W はカーネル関数と呼ばれる一種の重み関数であり、SPH法では一般的にはその近似として影響半径 h 内でのみ非ゼロ正值となるコンパクトサポートな関数かつUnity条件を満足する関数を用いている。上式の積分は、空間上に分布する粒子 \mathbf{x}_i を用いて離散化を行い、影響半径 h 内に含まれる近傍粒子の値を用いた重み付き総和によって近似できる。

$$\langle \phi_i \rangle (\approx \phi(\mathbf{x}_i, t)) := \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} W(r_{ij}, h) \phi(\mathbf{x}_j, t) \quad (2)$$

ここに下付き添え字 i, j は粒子番号を示し、 ρ_j, m_j はそれぞれ粒子 j が代表する近傍領域の密度と質量とする。

また、 $r_{ij} (=|\mathbf{r}_{ij}|)$, $\mathbf{r}_{ij} (= \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)$ はそれぞれ粒子間距離、相対位置ベクトルを示す。なお、本論文では $\langle \cdot \rangle$ はSPH法の基本概念に基づき、近傍粒子での値を参照して近似した値を示す。

関数の勾配はSPH法の近似式(2)を微分することで評価できるが、本解析では以下の2つの勾配に対する近似作用素を採用する。

$$\langle \nabla \phi_i \rangle = \frac{1}{\rho_i} \sum_j m_j (\phi_j - \phi_i) \nabla W(r_{ij}, h) \quad (3)$$

$$\langle \nabla \phi_i \rangle = \rho_i \sum_j m_j \left(\frac{\phi_j}{\rho_j^2} + \frac{\phi_i}{\rho_i^2} \right) \nabla W(r_{ij}, h) \quad (4)$$

また、関数のラプラシアンは以下のものを採用する。

$$\langle \nabla^2 \phi_i \rangle = \sum_j m_j \left(\frac{\rho_i + \rho_j}{\rho_i \rho_j} \frac{\mathbf{r}_{ij} \cdot \nabla W(r_{ij}, h)}{r_{ij}^2 + \eta^2} \right) (\phi_i - \phi_j) \quad (5)$$

ここで、式(5)中の η はゼロ割を避けるための安定化パラメータであり、影響半径 h を参照し $\eta^2 = 0.0001h^2$ を与えることにした。

(2) 流体解析における支配方程式

非圧縮条件下における流体問題を解くためには、質量と運動量の保存を満足しつつ、流速 \mathbf{u} と圧力 p という2つの独立変数を求める必要がある。支配方程式のLagrange記述での表記は次のようになる。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (7)$$

ここで、 ν は動粘性係数、 \mathbf{g} は重力加速度とする。非圧縮性の仮定より密度が一定とすれば、質量保存則(6)は以下のように書き換えられる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (8)$$

式(7), (8)を粒子 i において適用すると以下ようになる。

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} \approx -\frac{1}{\rho_i} \langle \nabla p_i \rangle + \nu \langle \nabla^2 \mathbf{u}_i \rangle + \mathbf{g}_i \quad (9)$$

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i \rangle \approx 0 \quad (10)$$

ここで、式(9)の右辺第1項は式(4)における関数 ϕ に圧力 p を代入すればそのまま評価でき、第2項については式(5)の ϕ に \mathbf{u} を代入すればよい。

(3) ISPH法

射影法を用いれば、ナビエ・ストークス方程式の圧力勾配項を無視した仮の状態を定義することで速度と圧力が分離でき、速度は陽的に圧力については陰的に更新する¹²⁾。SPH法に射影法を適用することを考え、時間ステップ n から $n+1$ における変数の更新手順を示す。まずは、式(7)中の時間微分項を前進差分近似するものとし、ある中間状態での速度 \mathbf{u}^* を定義することで速度を以下のように分離する。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n}{\Delta t} = \frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} + \frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n}{\Delta t} \quad (11)$$

分離後の加速度成分の内、前者が式(7)中の圧力勾配項に、後者はそれ以外の項に対応するものとすれば、仮の中間状態での速度 \mathbf{u}^* 以下のように評価できる。速度のラプラシアン項については式(5)を用いる。

$$\frac{\mathbf{u}_i^* - \mathbf{u}_i^n}{\Delta t} = \nu \langle \nabla^2 \mathbf{u}_i^n \rangle + \mathbf{g}_i$$

$$\rightarrow (\text{予測子}) \quad \mathbf{u}_i^* = \mathbf{u}_i^n + \Delta t \left(\nu \langle \nabla^2 \mathbf{u}_i^n \rangle + \mathbf{g}_i \right) \quad (12)$$

その後、いずれかの方法により圧力値が評価されたものとすれば、仮の中間状態から次の時間ステップにおける速度を以下のように更新することができる。

$$\frac{\mathbf{u}_i^{n+1} - \mathbf{u}_i^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \langle \nabla p_i^{n+1} \rangle$$

$$\rightarrow (\text{修正子}) \quad \mathbf{u}_i^{n+1} = \mathbf{u}_i^* + \Delta t \mathbf{u}_i^* \quad (13)$$

$$\Delta \mathbf{u}^* = -\Delta t \left(\frac{1}{\rho} \langle \nabla p_i^{n+1} \rangle \right) \quad (14)$$

上記の手順のように、2段階で状態を更新することがISPH法の特徴である。

なお、圧力は、次に示す圧力ポアソン方程式を解くことで評価できる。

$$\begin{aligned} \langle \nabla^2 p_i^{n+1} \rangle &= -\frac{\rho^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \Delta \mathbf{u}_i^* \rangle \\ &= \frac{\rho^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \rangle \end{aligned} \quad (15)$$

(4) 非圧縮条件を緩和したソース項

安定化ISPH法では、ISPH法と同様に射影法を用いて、式(2)に示すナビエ・ストークス方程式の圧力勾配項を除外した仮の状態を定義し、速度と圧力を分離し、速度は陽的に圧力を陰的に更新するという手法をとる。両者の違いは下記に示す圧力ポアソン方程式のソース項にある。詳細な式展開は参考文献²⁾に委ねる。

SPH法における密度は粒子配置により数値的に評価されるものであり、解析中に密度が一定である条件を厳密に満足し続けることは難しい。なぜなら、近傍粒子数が固定され、粒子が完全な一様分布を保持した状態でなければ、密度は一定とならないからである。このため、瞬間的にはある程度の密度誤差が介入することを許容し、長期的に密度変化が生じないようにスキームへと修正する必要がある。

$$\langle \nabla^2 p_i^{n+1} \rangle \approx \frac{\rho^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \rangle + \alpha \frac{\rho_i^0 - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2} \quad (16)$$

この圧力ポアソン方程式は、緩和パラメータをゼロとすれば速度発散ゼロ条件による定式化と完全に一致する。また、瞬間的に初期の密度と一致した場合（あるいは無視できるほど小さい場合）にもポアソン方程式のソース項の第2項目は無視できるため、両者は同一視できることになる。この定式化によれば、解析上生じる密度に関する累積誤差に対しては密度差の項で徐々に解消され、長期間の計算においても密度がほぼ一定に保たれることで体積保存性の良いスキームとなる。

(5) 仮想マーカーによる境界処理

粒子法では、固体壁に壁粒子を配置することで流体粒子が壁に貫通させないようにしている。しかし、これは固体壁面で満足すべき圧力ノイマン条件および速度のすべり・非すべり条件を厳密に満足させるものではない。そこで、仮想マーカー境界処理法を用いれば、上記の境界条件を近似的に満足させることができる。また既往の研究により、実際のなめらかな境界とは一致しない非適

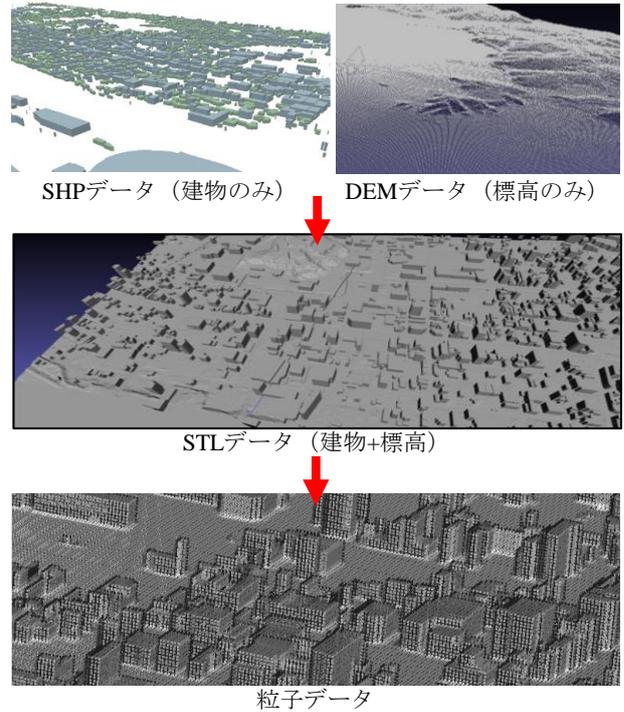


図-1 解析モデル作成フロー

合境界のときにも処理可能な方法として一般化されている。詳細は文献³⁾を参照いただきたい。

3. 解析例（高知市津波遡上解析）

本章では、まず地表面を詳細に再現するために構築した解析モデルの作成方法について説明し、その後高知市の津波遡上解析の実施例について紹介する。

(1) 解析モデル作成方法

精度よく津波遡上解析を実施するためには、複雑な都市部の建物群および標高分布を忠実に再現することが求められる。地表面の再現にはGISの2つのデータを用いる。地表面データは航空測量により計測した地表の標高情報を持つDEMデータ、建物データはGISより得られる建物の平面形状と地表面からの高さの情報が記録されたSHPデータをそれぞれ参照する。モデル作成フローを（図-1）に示す。2つのデータを統合することにより、法線情報を持つ三角形面の集合からなるSTLデータを作成する。STLデータは三次元CADソフト用の中間フォーマットであり、解析モデルの修正変更等の編集がCADソフトで可能である。粒子解析に用いる地表面境界の粒子データは、STLデータとして表された地表面形状から作成する。建物を含む詳細な地表面の精度を保持しながら必要なデータ量を削減するために、STLデータは地形と建物を表すデータの2種類に分けて定義した。地形を表すSTLデータの生成は、分解能2mのDEMデータを入力情報とし、

後に実施する粒子法の解析に十分な精度までに分解能を落として格子情報へと変換し、最後に上向きの法線情報を持つ2枚の三角形に変換したものをSTLとして保存した。一方、建物を表すSTLは、SHPデータから建物の3次元形状を生成し、生成した3D形状を構成する面に対して、内側から外側に向かう法線情報をもつ三角形面の集合となるよう、三角形分割を行うことで得る。ここで、建物の3次元形状は、地形のSTLデータから取得した標高を基準として建物の高さだけ平面形状を押し出すことで生成する。ここで、建物の底面は、地下に一定量(5m)だけ押し下げることで地表面との隙間を無くし、解析の際に建物と地形の間に隙間にSPH法による水粒子が入り込むことを防ぐことにした。両STLが準備できたら、STLデータ表面内部に境界粒子を均等に配置することで粒子解析モデルへと置換した。最後に、入力津波を想定した粒子データを、上記データに追加することで粒子解析モデルが完成する。

(2) 解析対象地の選定

津波防災の観点から最大級の地震を想定した津波遡上解析を行うこととした。近年危惧されている巨大地震として南海トラフ地震がある。この地震は南海トラフの広範囲を震源域とする連動型の巨大地震であり、発生した場合には太平洋沿岸地域で甚大な被害予想がなされている³⁾。本研究では太平洋沿岸地域の中でも、とりわけ津波被害規模が大きいことが想定される高知県⁴⁾を対象に津波遡上解析を行う方針とし、県庁所在地の高知市を解析対象地とした。しかし、高知市の陸域だけを粒子モデル化した場合でも、粒子数は粒子径4mのモデルで約3519万個、粒子径2mでは約1億8485万個まで増加し、現在の計算機環境では解析が困難な規模となった。このため、大規模遡上解析に向けた試行段階として、試験的に(図-2 赤枠)に示す津波遡上時には川の氾濫が起ると予想される⁵⁾鏡川沿い約800m×約1000mの地域を対象として解析を行った。

(3) 解析概要

2m粒子解析モデルの概要を(図-3)に示す。解析箇所下方に位置する鏡川から津波が氾濫することを仮想し流入させる津波を設置した。また高知県危機管理部南海トラフ地震対策課による高知市の津波浸水予想⁶⁾をもとに波高4mの津波を想定し、津波伝播速度の初期条件は長波理論に基づく波速式 $c = \sqrt{gh}$ より波速9m/sとした。この初期条件を津波領域に一様に付加することで、津波遡上を表現する。数値解析は理化学研究所のスーパーコンピュータ京を用いた並列計算により行い、詳しい数値解析条件は表-1に示す通りである。

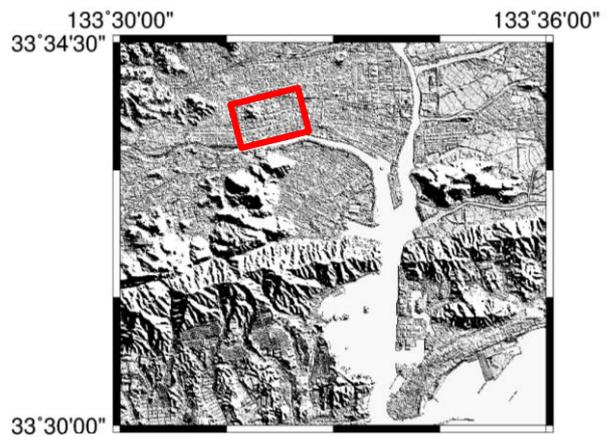


図-2 解析対象地

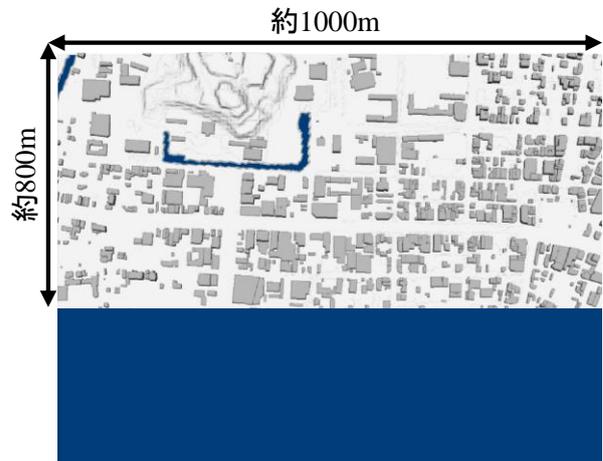


図-3 解析粒子モデル概要



図-4 解析結果

表-1

粒子径	総粒子数	時間増分	総ステップ数	解析時間 (256node)
2m	約520万個	0.005	30000	3時間

(4) 解析結果

解析開始から12000step後(実時間で60秒後)の解析結果を(図-4)に示す。図よりこの時間帯では内陸まで津波が浸水するが、高台にある標高44.4m程度の高知城周辺には津波は到達せず、また高層ビルの3階から4階程度以上は水没していないことを確認した。高知城は同地

区における避難場所として指定されており、本解析結果でもその安全性を評価できていることから妥当な解析結果が得られているものと判断した。以上のように、具体的な地域・建物群を詳細に再現し、津波遡上解析を実施すればより具体的かつ精緻な防災マニュアルの立案ができるものとする。ただし現時点では簡易な流入条件を与えているため浸水域に関して詳細な議論は困難である。また本ツールでは崩壊、流出といった建物の被害をシミュレーションするまではいたっていないことを注意書きしておく。

4. フォトリアリスティック可視化

図-4に示した解析結果表示は、解析に用いた粒子をそのまま表示したものである。粒子に解析から得られた物理量、たとえば圧力コンターを付与すれば、図-5のように津波波力の分布を知ることができる。同データを用いれば建物の強度基準設定や家屋の脆弱性の診断などが実施できるなど、工学的な観点からハード防災に資する情報提供が可能となる。しかし、防災教育等のソフト防災への活用を念頭に置いた場合、津波の脅威をより直感的かつ現実的に伝える方法が望ましい。このため本研究では、解析結果の可視化方法を写実性に特化したフォトリアリスティックな三次元立体動画へと発展させた。動画の作成には建築分野での景観設計等でシェアを広げている可視化用ソフト lumion を用いた。以下にはその動画作成手順を説明する。

まず解析により得られた各時間ステップでの津波粒子データの表面粒子を、マーチンキューブ法により三角形メッシュで補完することで STL データへと再変換する。これにより 3次元 CAD により津波と建物データの STL データと津波情報を統合することが可能となる。この統合した建物・津波データの表面に lumion 上で建物には写真、津波には波を模擬した画像をテクスチャマッピングすることで (図-6) のような立体的風景を再現した。最後に、津波情報については各時間ステップの解析データを時系列で連続的に読み込むことで動画の基礎情報が完成する。なお、lumion では視点情報を与えることができるため、実際に人の目線から見た動画も作成することができる。このような写実性に特化した可視化方法を行えば、津波の脅威をより直感的に伝えられるため、防災教育へと有効活用することができるものと考えている。

5. まとめと今後の課題

GIS データに基づく解析粒子モデル作成ツールを構築し、高知市を対象とした三次元津波遡上解析を実施する

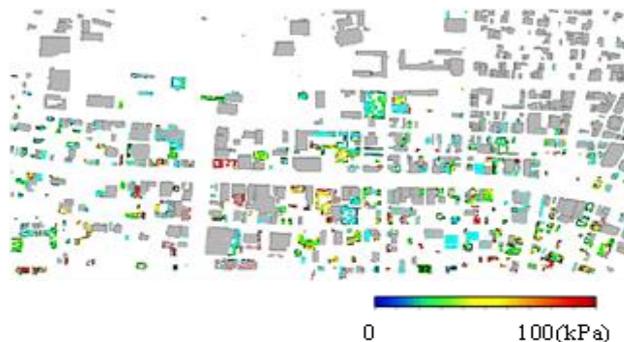


図-5 圧力コンター表示



図-6 三次元立体動画スナップ画像

ことで、その防災・減災への利活用について検討を行った。また解析結果をフォトリアリスティックな可視化を実践することで、ソフト防災への活用が期待できる動画作成に成功した。本研究で用いた津波の流入条件は、一定の波高を持つ津波を継続して与えるといった試行的な条件であるため、現時点では浸水域等の信頼性に欠ける。今後は、広域の津波遡上解析と連動させた3次元津波遡上解析が可能なツールへと発展させていく予定である。

参考文献

- 1) 国土地理院:<http://www.gsi.go.jp/>
- 2) Mitsuteru Asai, Abdelraheem M. Aly, Yoshimi Sonoda and Yuzuru Sakai, A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, International Journal for Applied Mathematics, Volume, Article ID 139583, 24 pages, 2012
- 3) 浅井光輝, 藤本啓介, 田邊将一, 別府万寿博: 階段状の非適合境界を有する粒子法解析における仮想マーカーを用いたすべり・非すべり境界処理法, 計算工学論文集 No.20130011, 2013.04.
- 4) 内閣府 南海トラフ巨大地震対策について
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130528_houkou_s1.pdf
- 5) 高知県南海トラフ地震対策課
<http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/nannkai-3.html>