粒子法による高分解能な津波解析のための GIS データから都市モデルへの変換手法

藤田 航平¹・市村 強²・堀 宗朗³・

MADDEGEDARA Lakshman Lalith Wijerathne⁴・田中 聖三⁵

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: fujita@eri.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学地震研究所(〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail: ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学地震研究所(〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 東京大学 Global Center of Excellence for Sustainable Urban Regeneration(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: lalith@eri.u-tokyo.ac.jp

⁵正会員 東京大学地震研究所(〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail: stanaka@eri.u-tokyo.ac.jp

粒子法による高分解能な津波解析に使うことを念頭に、地理情報システム (Geographic Information System, GIS) 上に蓄えられた標高・建物データから都市モデルを構築する手法を開発する。入力として 2 次元 GIS データの一種である DMD (Digital Mapping Data) を使い、多数の粒子を用いて地面と建物壁面の形状を表す都市モデルを構築する。ここでは、2 次元 GIS データを 3 次元形状からなる都市モデルに変換するため、標高情報の補間アルゴリズムを開発した。構築した都市モデルに粒子法による津波解析が適用できることを確認するため、粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いた数値流体解析プログラムを開発し、構築した都市モデルを使って模擬的な津波解析を行う。解析結果では、建物形状が数値解析に反映されており、構築された都市モデルを津波解析の入力として使うことができることを確認した。

Key Words : *automatic city modeling, tsunami simulation, Digital Mapping Data, particle method, Smoothed Particle Hydrodynamics*

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震は広範囲における強い地震動・津波を引き起こし、特にこの地震による津波は、建物の破壊やがれきの漂流によって甚大な人的・経済的被害を及ぼした¹⁾。上記の災害に対する社会の反応は、災害の知覚・避難行動・復旧活動などの複数のステップからなっており、地震・津波災害に対して有効な対策を講じるには多種の自然災害とそれに対する社会の反応を考慮した統合的な分析が必要となっている。

自然災害による社会の反応の予測のため、統合自然災害シミュレーション (Integrated Natural Disaster Simulation, INDS) が研究されている^{2),3),4),5)}。INDS は、自然災害を入力とした、都市における災害の発生、構造物の被害、被害に対する社会の対応行動のシームレスなシミュレーションである。過去の災害の統計分析を使う手法とは異なり、INDS では大規模数値計算に基づく被害予測を行う。INDS に津波解析を組み込むことで、地震応答解析や避難行動シミュレーションなどを組み合わせた統合的な津波シミュレーションが可能となる。

建物の破壊・がれきの漂流による被害を予測するため、INDS に組み込む津波解析は、破壊解析が可能な流体・固体連成解析を建物の構造部材スケールで行う、高分解能な津波解析 (High Resolution Tsunami Simulation, HRTS) とする。現在広く使われている津波解析^{6),7),8)}では、長波理論に基づく流体の 2 次元解析 (分解能 10m 以上) が主流であるが、支配方程式を 3 次元的に離散化する流体・固体連成破壊解析を分解能 1m 以下で行う点に HRTS の特徴がある。HRTS の実現にあたり、上記の解析手法の開発に加えて、標高と建物一軒一軒の構造部材の形状・物性を含む高詳細な都市モデルの作成が課題となる。本研究では、INDS の都市モデル構築手法を拡張することで HRTS の入力となる都市モデルを構築することを目標とする。

INDS では、実在の都市の自然災害シミュレーションを行うため、地理情報システム (Geographic Information System, GIS) 上に蓄えられたデータを使って各々のシミュレーション (地震応答・避難行動・津波シミュレーションなど) の入力となる都市モデルを構築する。ここでは、多種の GIS データから、多種のシミュレーショ

ンの入力となる形式の異なる都市モデルを構築できるよう、汎用性・拡張性に優れた都市モデル構築手法が必要となる。同時に、市町村や都道府県といった広域でシミュレーションを行うため、GIS データから都市モデルへの自動変換が必要となる。都市の形質(建物・地形・堤防等の要素)は年々変わっており、それに伴う都市モデルの更新においても、都市モデル構築手法の自動化は有用である。広域の都市モデルは多くの建物など、膨大な数の要素からなるため、都市モデルの自動構築に際しては、多数の入力に対しても変換プログラムが正常に動作するよう、堅牢性の高い変換手法が必要である。

INDS はこれまで構造物の地震応答・避難行動シミュレーションを中心に開発が進められており、これらのシミュレーションの入力となる建物データのモデル化手法が開発されている^{2),3),4),9)}。本研究では、INDS の都市モデル構築手法の一環として、2 次元の GIS データから標高をモデル化する手法を開発し、HRTS 用の都市モデルを自動構築する手法を開発する。HRTS では建物の構造部材の分解能で都市をモデル化・解析することを目指しているが、本研究では、標高と建物の外形形状のモデル化までを行う。ここでは、砕波や建物の角での分岐・合流など、複雑な自由表面形状の変化を含む問題に適した数値解析手法である粒子法に使うことができる都市モデルを構築する。

構築した都市モデルが津波解析の入力データとして利用できることを確認するため、粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法^{10),11)}を用いた流体解析プログラムを開発し、模擬的な津波解析を行う。3 次元的に支配方程式を離散化すると数値解析の問題規模が大きくなるため、大規模問題に対応した分散メモリ型の並列解析プログラムを開発する。

2. 高分解能な津波解析の研究例

高分解能な津波解析の実現に向けて、浅井ら、安田らが先駆的な研究を行っている。浅井ら¹²⁾は、津波解析の適用対象となる都市モデルに注目し、GIS データの一種である DEM (Digital Elevation Map) を入力に標高データからなる都市モデルを作成し、SPH 法を用いた 3 次元流体解析を実行している。安田ら^{13),14)}は、標高に加えて、建物の CAD (Computer Aided Design) データを用いて建物をモデル化した都市モデルを作成し、3 次元流体解析を用いた浸水解析を行っている。安田らの解析例では、最大 700 × 500m の大きさの領域を約 2m の解像度(格子数 238 × 243)で都市モデルの作成及び解析を行っており、これらの研究から、実地形と建物外形からなる都市モデルを入力に 3 次元流体解析を使った

津波解析が街区(数 100m 四方)スケールで実現できるようになりつつあることがわかる。

津波解析あるいは浸水解析に特化した都市モデル構築手法を使う上記の研究と比べ、本研究で開発する都市モデル構築手法は汎用性・拡張性に富む。本研究の都市モデル構築手法を使うことで、津波解析のための都市モデルだけでなく、INDS に組み込まれる多種類のシミュレーションの入力都市モデルを構築することができるなど、本研究の手法は同一の都市に多種のシミュレーションを作用させる統合津波シミュレーションに向けた都市モデル構築手法である。また、広域に対して都市モデルを自動構築することを前提に、データ変換の堅牢性が高い手法を採用していることも本研究の特徴である。

3. 都市モデル構築手法

INDS においては、入力 GIS データを各種シミュレーション用の都市モデルに直接変換することはせずに、中間モデルデータ(Common Modeling data, CMD)^{3),4)}を経るように 2 段階に分けて変換を行う。多種の GIS データを共通の CMD に変換し、それを各々のシミュレーションの入力都市モデルに変換する手法をとることで、変換プログラムの再利用が可能となり、都市モデル構築手法の汎用性・拡張性を高めることができる。また、通常 N 種の GIS データから M 種の都市モデルを構築する際、 $N \times M$ 個の変換プログラムが必要となることを、 $N + M$ 個に減らすことができるため、変換プログラム一つあたりに割くことのできる時間を長くとることができる。これにより、データ変換の堅牢性を高めることに力を注ぐことができる。

既存の都市モデル自動構築手法は、i) DEM あるいはレーザプロファイルを用いて標高をモデル化する手法^{3),12),13),14),15)}、及び ii) 各種の GIS データから建物をモデル化する手法^{3),4),16)}が主である。DEM とは、対象領域を 2 次元の構造格子で区切り、各格子点における標高値を格納した GIS データである。津波解析に有用な分解能(1m スケール)で DEM やレーザプロファイルが得られる地域は限られているため、広範囲で入手可能な GIS データに基づく標高のモデル化手法を開発することで津波解析の適用範囲を広げることができる。そこで、本章では、広く整備されている 2 次元 GIS データに含まれる等高線から標高をモデル化する手法を開発し、ii) で挙げた建物のモデル化手法と合わせることで、GIS データから都市モデルを自動的に構築する仕組みを開発する。

まず、入力 GIS データに含まれる標高データを CMD のデータ形式の一種である Grid 形式に変換する。Grid

とは、空間を構造格子で区切り、格子点ごとに整数や浮動小数点数などのデータを格納する形式である。DEM は 2 次元の Grid 形式とみなすことができる。次に、標高を格納した Grid (標高 Grid) と建物高さを格納した Grid (建物 Grid) を入力に、粒子法による数値解析に使うことができる都市モデルを作成する。

なお、標高のデータ形式として、DEM (標高 Grid) と並んで TIN (Triangulated Irregular Network) 形式のデータが広く使われている^{17),18)}。TIN とは、地表面形状を重複のない三角形の集まりとして配列したものであり、3 次元座標を持った点と、それらの接続情報からなっている。適用先となる数値シミュレーションでは、Grid 形式からの変換が容易な格子状の規則的な入力データが求められることが多いため、本研究では Grid 形式を用いる。

(1) 2 次元 GIS から標高 Grid への変換

入力として広く整備されている 2 次元 GIS データである DMD (Digital Mapping Data) を使う。DMD はもともと 2 次元平面に投影して数値地図として用いるものである (図-1.i 参照)。等高線から DEM (標高 Grid) を作成する手法は各種開発されている^{18),19),20)}。これらの手法は、標高既知の等高線から DEM を高精度で補間する手法である。2 次元平面に投影するとわからないが、DMD においては等高線の標高は未知であるため基準点で与えられた z 座標を使って等高線の標高を推測する必要がある。従来では、この部分の作業は対話的に行われてきた¹⁸⁾。本章の主眼はこの作業の自動化である。等高線の標高を推測したうえで、格子点での標高を補間することで標高 Grid を作成する。

a) 等高線の標高の推測

基準点と等高線の位置関係から等高線の標高を推測するアルゴリズムを設計する。広域都市に適用することを前提に、多種多様な入力データに対しても変換プログラムが正しく機能する、堅牢性の高い推測アルゴリズムとすることを設計の指針とする。そのため、簡単な操作の集まりからなる推測アルゴリズムを設計する。使われる操作は、2 点間の距離の計算・線分の交差判定・線分の交差点の計算・距離に応じた並び替えの 4 つであり、これらの操作は簡単かつ確実にコードでき、バグを抑えることに役立つ。加えて、アルゴリズムの条件分岐で例外が生じないように注意を払うことで堅牢性の高い推測アルゴリズムを目指す。

まずアルゴリズムの操作対象となるデータの表記を整理する。基準点の集合を P とし、その第 i 番目の要素を p_i と記す。基準点 p_i は 3 次元の点であり、それぞれの x, y, z 座標を

i) DMD の 2 次元投影図

#2Dcontours
$x_{11}, y_{11}, x_{12}, y_{12}, \dots, x_{1n}, y_{1n}$
$x_{21}, y_{21}, x_{22}, y_{22}, \dots, x_{2n}, y_{2n}$
...
#3Dpoints
x_1, y_1, z_1
x_2, y_2, z_2
...

ii) DMD における標高データ

図-1 DMD

$$x[p_i], y[p_i], z[p_i] \quad (1)$$

で表す。等高線の集合を L とし、その第 i 番目の要素を l_i と記す。等高線 l_i は z 座標と 2 次元の点の集合からなり、それぞれ

$$z[l_i], Q[l_i] \quad (2)$$

で表す。 $Q[l_i]$ の第 j 番目の要素を q_{ij} と記し、その x, y 座標を

$$x[q_{ij}], y[q_{ij}] \quad (3)$$

で表す。標高推測アルゴリズム開始前は、すべての等高線で $z[l_i]$ に値は与えられていない。以上が入力データの表記であるが、アルゴリズムの途中で使う 3 次元の線分についても表記を整理する。3 次元の線分の集合を M とし、その第 i 番目の要素を m_i と記す。線分 m_i の始点を m_{i1} 、終点を m_{i2} とし、それぞれの x, y, z 座標を

$$x[m_{ij}], y[m_{ij}], z[m_{ij}] \quad (j = 1, 2) \quad (4)$$

で表す．

次に，アルゴリズムで使われる操作の表記を整理する．まず，2点 p, q 間の $x-y$ 平面上の距離を

$$|p - q| = \sqrt{(x[p] - x[q])^2 + (y[p] - y[q])^2} \quad (5)$$

で記す．線分 m と等高線 l の $x-y$ 平面上の交差点を2次元点 $q[m, l]$ と表す．線分の並び替え (sort) に関しては後ほど説明する．集合 $\cdot$ の要素数を $|\cdot|$ と表す．

DMD の等高線で重複しているものを削除し，端点が一致するものを接続した上で，以下の手順 i) - iii) で等高線の標高を推測する．

i) 各基準点に一番近い等高線に基準点の標高を与える (図-2.i)．標高の与えられた等高線の集合を C とする．即ち，

- 1: $C \leftarrow \emptyset$
- 2: **for all** $p_i \in P$ **do**
- 3: find $l_j \in L, q_{jk} \in Q[l_j]$ which minimizes $|p_i - q_{jk}|$
- 4: $z[l_j] \leftarrow z[p_i]$
- 5: add l_j to C
- 6: **end for**

第2行目において，基準点と等高線の距離を，基準点と等高線を構成する点の間の距離として計算している．第4行目における $z[l_j]$ が等高線 l_j の z 座標の推定値となる． C は標高が推定された等高線の集合となる．

ii) 標高が与えられた等高線を標高線と呼ぶ．各標高線に対し，その標高より標高が低い標高線のうち，一番近いものを選ぶ．これらの標高線の組で一番近い2点を結ぶ線分を引く (図-2.ii)．該当する標高線が無い場合は，その標高線を飛ばす．即ち，

- 1: **for all** $l_i \in C$ **do**
- 2: $C_i \leftarrow \{l_j \mid l_j \in C \wedge z[l_j] < z[l_i]\}$
- 3: **if** $C_i \neq \emptyset$ **then**
- 4: find $q_{ij} \in Q[l_i], l_k \in C_i, q_{kl} \in Q[l_k]$ which minimizes $|q_{ij} - q_{kl}|$
- 5: $m_i \leftarrow \{(x[q_{ij}], y[q_{ij}], z[l_i]), (x[q_{kl}], y[q_{kl}], z[l_k])\}$
- 6: **end if**
- 7: **end for**

第2行目において，標高線 l_i より標高が低い標高線を C から選んでいる．第4行目では，標高線と標高線の

i) 基準点に一番近い等高線に標高を与える．

ii) l_i と l_k の間で一番近い2点を結ぶ線分 m_i を引く．

iii) m_i と交差する等高線を数え， m_i の端点の標高差と整合すればそれらの等高線に標高を与える．

図-2 等高線の z 座標の推測手法

間の距離を，標高線を構成する2次元点どうしの距離として計算している．第5行目における m_i が標高線の組 l_i, l_k の間で一番近い2点を結ぶ線分となる．

iii) 最後に，各線分 m_i と交差する等高線の数を数え，線分の両端の標高差と整合すれば，それらの等高線に標高を与える (図-2.iii)．線分の両端の標高差と交差する等高線の数が整合しない場合は，その線分 (m_i) を飛ばす．即ち，

- 1: **for all** $m_i \in M$ **do**
- 2: $L_i \leftarrow \{l_j \mid l_j \in L \wedge l_j \text{ intersects with } m_i\}$
- 3: **if** $(|L_i| + 1)dz = z[m_{i1}] - z[m_{i2}]$ **then**
- 4: sort $L_i = \{l_{ij}\}$ such that $|m_{i1} - q[m_i, l_{i1}]| \leq |m_{i1} - q[m_i, l_{i2}]| \leq \dots \leq |m_{i1} - q[m_i, l_{i|L_i|}]|$
- 5: **for** $j = 1$ **to** $|L_i|$ **do**
- 6: $z[l_{ij}] \leftarrow z[m_{i1}] - j \cdot dz$
- 7: add l_{ij} to C
- 8: **end for**
- 9: **end if**
- 10: **end for**

ここで, dz は等高線の刻み幅である. 図-2.iii) においては $dz = 10\text{m}$ となる. 第 2 行目で, 等高線の集合 L から m_i と交差する等高線を選び出した部分集合 L_i を求めている. 第 3 行目で, m_i と交差する等高線の数と, m_i の両端の標高差が整合するか確認している. 図-2.iii) においては, m_i と交差する等高線の本数は 2 本, m_i の端点の標高差は 30m なので, この場合は次のステップ(第 4 行目)に進む. 第 4 行目において, 等高線の並び替えを行っている. ここでは, L_i の要素 $\{l_{ij}\}$ を m_i の始点 m_{i1} に近い順に並び変えている. 等高線と点の距離の計測には, 線分と等高線の交差点 $q[m, l]$ と m の始点との間の距離を用いている. 第 6 行目において並び変えた順番で等高線に標高を与えている. これにより, 標高線に挟まれた等高線の標高を推測することができる. 最終的に C に含まれる要素が標高を推定した等高線となる.

以上の推測アルゴリズムを実装した変換プログラムを用いて, 高知市の DMD タイル 743 区画の変換を行った. 各 DMD タイルは大きさ $800 \times 600\text{m}$ の区画である. すべての区画においてプログラムが異常終了することなく推測作業が行われ, プログラムが高い堅牢性を持つことを確認した.

データ変換の変換率の指標として, 正しく標高が推測された等高線の本数の割合

$$R = \frac{N}{N_0} \times 100 (\%) \quad (6)$$

を使う. ここで, N は正しく標高が推測された等高線, 即ち, 同じ DMD タイルを 2 次元平面に可視化したものを使って, 等高線の標高の同定を人間が手作業で行った場合の結果と一致する等高線の本数である. N_0 は入力となる DMD タイルに含まれている等高線のうち, 重複するものを削除し, 端点が一致するものを接続したのちの等高線の本数である. 図-3.a) は高知市の DMD タイルのうち, 0A-00.dm の変換結果である. 黒線は正しく標高が推測された等高線, 赤線は推測されなかった等高線である. ここでは, $R = 77.2\%$ であった. ここでは, 推測されなかった等高線は付近で一番高い基準点より高い位置にあるもの(あるいは一番低い基準点より低い位置にあるもの)であり, 2 本の標高既知の等高線間に挟まれた等高線の標高を推測する本章のアルゴリズムでは標高を推測することができなかった(図-4.a 参照). 次に, 等高線の本数が少ない DMD タイル(I-15.dm)の変換結果を図-3.b) に示す. こちらの場合は, $R = 36.4\%$ となっており, 正しく推測された等高線の割合は減少している. これは, 上記の等高線の標高の推測失敗理由に加え, 元データにおいて等高線と道路等の線が交差する点において等高線が細切れになっているため, 一

部の等高線の標高が推測されていても, つながっていないはずの他の等高線の標高が推測できていないためである(図-4.b 参照). なお, 上記のいずれの場合においても, 推測された標高線はすべて正しい標高値が推測され, 誤った z 座標を持つ標高線はなかった. 変換率 R は決して高くはないが, 標高値の荒い近似として使うことは可能である. 等高線の左右関係・包含関係・曲率等の情報を加味したアルゴリズム, あるいは細切れになった等高線の接続アルゴリズムを設計し, 変換率の向上を図ることが今後の課題である.

なお, より高い変換率で標高データを作成する必要がある場合には, 以上のアルゴリズムで推測されなかった等高線に標高を手作業で割り与えることになるが, 本手法を使うことですべての等高線に対して同様の作業を行う場合と比べて作業量を減らすことは可能である. 以下, 自動でデータ変換を行うことを想定し, 手作業は一切用いない方法で検討を進める.

b) 標高 Grid への変換

次に, 標高の推測された等高線を用いて標高 Grid を作成する. 各種の補間アルゴリズムの中でも, 比較的事業が容易な minimum curvature 法²¹⁾, 及び, 最短距離法を用いて Grid を構成する格子点での z 座標を補間する. ここでは, 基準点及び標高の推測された等高線を構成する点群を標高既知の点群とみなして補間を行う.

Minimum curvature 法は $x-y$ 面内の曲率の積分

$$E[z] = \iint \left(\frac{d^2 z(x, y)}{dx^2} + \frac{d^2 z(x, y)}{dy^2} \right)^2 dx dy \quad (7)$$

が最小となるように関数 $z(x, y)$ を求める方法である. 中央差分を用いて $z(x, y)$ を離散化し, 標高既知の点での z 座標を拘束条件として最小値問題を解くことで格子点での z 座標を得る. 詳しい手法は文献²¹⁾に記載されている.

最短距離法は格子点から一番近い標高既知の点の z 座標を格子点での z 座標とする方法である. 即ち,

```
for all  $i, j$  do
  find  $k$  that minimizes  $\sqrt{(x_i - \bar{x}_k)^2 + (y_j - \bar{y}_k)^2}$ 
   $z_{ij} \leftarrow \bar{z}_k$ 
end for
```

ここで, $(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)$ は標高既知の第 i 番目の点の座標であり, (x_i, y_j, z_{ij}) は格子点 (i, j) の座標である. このままでは補間された標高に不連続面が生じてしまうため,

```
for all  $i, j$  do
   $z'_{ij} \leftarrow \frac{1}{9} \sum_{k \in I, l \in J} z_{kl}$ 
```

a) 0A-00.dm

b) I-15.dm

図-3 等高線の推測結果．黒線は正しく標高が推測された等高線，赤線は標高が推定されなかった等高線．

end for

として z_{ij} を平滑化し、 z'_{ij} を格子点 (i, j) での標高の最終的な出力結果とする．ここで、

$$I = \{i-1, i, i+1\}, \quad J = \{j-1, j, j+1\} \quad (8)$$

である．

図-5 は I-15.dm の変換結果である．格子間隔は x, y 方向ともに 10m としている．図-5.a) から、minimum curvature 法を使った場合、タイルの外周部で大きく標高面が跳ね上がっているのが分かる．最短距離法を使った結果である図-5.b) では外周部において標高面は平らになっている．標高線の数が少ない場所では標高が激しく変化しないことを考慮し、本研究では最短距離法を使う．

データ変換の堅牢性を測定するため、高知市の DMD

a) 0A-00.dm の右端のズームアップ．付近の基準点で一番高いものは 640m であり、それより高い位置にある 3 本の等高線の標高が推測できていない．

b) I-15.dm の中央付近のズームアップ．等高線が図中点線で示される道路などの交差点で細切れになっているため、一部の等高線においてのみ標高が推測され、つながっているはずの他の等高線の標高が推測できていない．

図-4 等高線の推測の失敗例．黒線は正しく標高が推測された等高線，赤線は標高が推定されなかった等高線．

タイル 743 区画において最短距離法を用いた変換プログラムを実行した．元データに基準点が含まれていない区画を除き、すべての区画において、標高線は標高 Grid に変換され、本手法が高い堅牢性を持つことを確認した．

変換された標高データの定量的な精度(実地形の標高と標高 Grid の誤差)は元データ(DMD)に大きく左右されるため、議論することは難しいが、定性的には、I-15.dm のように先述の等高線推測アルゴリズムで多くの等高線の標高が推測されていない区域においても、標高が凸になっている位置の再現等、入力 DMD の特徴をとらえた標高 Grid が作成されている．

a) minimum curvature 法

b) 最短距離法

図-5 標高線を用いた標高 Grid の作成結果．紫の点は標高既知の点を表す．

(2) Grid 形式から粒子形式都市モデルへの変換

標高 Grid と建物 Grid を入力に，粒子法による数値解析に使う都市モデルを作成する．建物 Grid は上戸ら⁴⁾の方法を用いて DMD から自動変換したものを使う．建物 Grid とは，各格子点の座標での建物高さ h を格納したものである．格子点上に建物がない場合， $h = 0$ となっている．標高 Grid 及び建物 Grid の格子間隔はそろっているもの ($\Delta x = \Delta y = d_0$) を使う．

粒子法による流体解析では，壁面や地面などの境界面を境界粒子でモデル化する^{10),11)}．流体粒子との相互作用の計算のため，境界面は複数層にわたって規則的に配列した粒子からなっている．そこで，すべての格子点 (i, j) に対し，位置

$$(id_0, jd_0, Z_{ij} - \alpha d_0) \quad (9)$$

に境界粒子を配置する． α は

$$\alpha = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{Z_{ij} - \min_{k \in I, l \in J} Z_{kl}}{d_0} + \frac{1}{2} \right\rfloor + (n_0 - 1)$$

の値をとる．ここで， $\lfloor \cdot \rfloor$ は床関数， d_0 は格子間隔及び粒子の配置間隔， n_0 は境界の厚さであり， z_{ij} ， h_{ij} を格子点 (i, j) での標高と建物高さとしたとき，

$$Z_{ij} = z_{ij} + h_{ij} \quad (10)$$

である．また，

$$I = \{i - n_0, i - n_0 + 1, \dots, i + n_0\} \quad (11)$$

$$J = \{j - n_0, j - n_0 + 1, \dots, j + n_0\} \quad (12)$$

である．これにより，境界の厚さを任意の正の整数 n_0 に設定でき，建物の下の地面の境界粒子など，不要な境界粒子を除いて都市モデルを構築することができる．同一建物内で建物の高さが変化する場合に生じる壁面も粒子で表される．

以上の手順によって構築した都市モデルの一例を図-6に示す．ここでは，高知市の DMD タイル N-14.dm の大きさ 30×30 m の一区画を示している．境界には粒子を2層使い， $d_0 = 1$ m としている．色は粒子の z 座標を示している．図-6.a) から，建物外形が反映された都市モデルが作成されていることが分かる．図-6.b) から，建物の下の地面の境界粒子が除かれていることがわかる．また，壁面が境界粒子でモデル化されていることが分かる．図からは判別しにくい，標高による起伏も都市モデルに反映されている．

4. 流体解析手法

(1) SPH 法

本研究では，非圧縮粘性流体にわずかな密度変化を許すことで，弱圧縮性の流体として陽的に解く Weakly Compressible SPH (WCSPH) 法¹⁰⁾を用いる．以下，用いた WCSPH 法の要約を記す．

SPH 法では，kernel 関数 $W(\mathbf{x}, h)$ を用いて，関数 $f(\mathbf{x})$ を

$$f(\mathbf{x}) \sim \int_V f(\mathbf{y}) W(\mathbf{x} - \mathbf{y}, h) d\mathbf{y} \quad (13)$$

として近似する．ここで， h は smoothing length， $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ は3次元の位置， V は $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ の定義域である．Kernel 関数は $h \rightarrow 0$ の極限でデルタ関数になるなど，いくつかの条件を満足する関数であり，本研究では cubic spline

a) 俯瞰図．建物の外形形状が都市モデルに反映されている．

b) 側面図．建物の外壁・天井が境界粒子で表されている．建物の下の地面をモデル化する境界粒子が除かれている．

図-6 粒子からなる都市モデルの変換結果

$$W(\mathbf{x}, h) = \begin{cases} \frac{1}{\pi h^3} (1 - 3/2r^2 + 3/4r^3) & 0 \leq r < 1 \\ \frac{1}{4\pi h^3} (2 - r)^3 & 1 \leq r < 2 \\ 0 & 2 \leq r \end{cases} \quad (14)$$

を用いている．ここで， $r = |\mathbf{x}|/h$ を表す． V 上の点からなる点群 $\{\mathbf{x}^a\}$ を設定し，それぞれの点 $\mathbf{x}^a$ に対し，質量 m^a ・密度 ρ^a を定義する．これらの属性の与えられた点を粒子と呼ぶ．粒子 $\mathbf{x}^a$ での f の値を f^a とすることで，式 (13) は

$$f^a \sim \sum_b f^b W(\mathbf{x}^a - \mathbf{x}^b, h) \frac{m^b}{\rho^b} \quad (15)$$

と離散化できる． h の選び方には任意性があるが，本研究では $h = 1.2d_0$ (d_0 : 初期粒子配置間隔) を使った．

離散化の対象となる支配方程式は Navier-Stokes 方程

式

$$\frac{Dv_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu_0 \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} \quad (16)$$

及び連続式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \quad (17)$$

である．ここで， v_i, g_i は i 方向の流速，重力加速度であり， t, p, ρ, ν_0 は時間，及び流体の圧力，密度，動粘性係数である． $\frac{D}{Dt}$ はラグランジュ微分

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_i \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (18)$$

である．式の表記に総和規約を用いている．

式 (16) を離散化することで，粒子速度の時間発展は

$$\begin{aligned} \frac{dv_i^a}{dt} = & - \sum_b m^b \left(\frac{p^a}{(\rho^a)^2} + \frac{p^b}{(\rho^b)^2} \right) W_{,i}(\mathbf{x})|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^b-\mathbf{x}^a} \\ & + g_i + \sum_b m_b \frac{4\nu_0(v_j^b - v_j^a)W_{,j}(\mathbf{x})|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^b-\mathbf{x}^a}}{(\rho^a + \rho^b)|\mathbf{x}^b - \mathbf{x}^a|^2} (v_i^b - v_i^a) \end{aligned} \quad (19)$$

で求めることができる．ここで， $\{\mathbf{x}^a, \mathbf{v}^a, \rho^a, p^a, m^a\}$ はそれぞれ粒子の位置，速度，密度，圧力，質量であり， v_i^a は $\mathbf{v}^a$ の第 i 成分， $W_{,i}(\mathbf{x})$ は $W(\mathbf{x})$ の第 i 方向への偏微分 $\frac{\partial W(\mathbf{x})}{\partial x_i}$ である．上式の粘性項に含まれるラプラシアン の計算には Lo らの手法²²⁾を使った．粒子の位置は XSPH correction¹¹⁾を使って，

$$\frac{d\mathbf{x}_i^a}{dt} = \mathbf{v}_i^a + \epsilon \sum_b \frac{2m^b}{\rho^a + \rho^b} (v_i^b - v_i^a) W(\mathbf{x}^b - \mathbf{x}^a) \quad (20)$$

で更新する．ここで，パラメータ ϵ には 0.5 を使った．次に式 (17) を離散化することで，密度の時間発展を

$$\frac{d\rho^a}{dt} = \sum_b m_b (v_i^b - v_i^a) W_{,i}(\mathbf{x})|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^b-\mathbf{x}^a} \quad (21)$$

で求める．各粒子の質量は不変である．

以上は支配方程式の離散化であるが，弱圧縮性流体では非圧縮性流体に比べて未知数が一つ増えるため，以下の関係式を仮定して，圧力を密度 ρ の関数として求める．

$$p(\rho) = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma} \left\{ \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right\} \quad (22)$$

ここで， $\gamma = 7$, ρ_0 は基準密度， c_0 は基準密度での音速である．本研究では， $c_0 = 10v^M$ となるように設定した． v^M はシミュレーション中の最大流速であり，ダムブレ

図-7 k-d 木による解析領域の領域分割．色は領域分割を表す．各領域に含まれる流体粒子の数が同程度となるように x, y 方向に交互に分割する．図は，4 つの領域に分割した場合を表す．

イク問題においては最大水深 H を使って $v^M = \sqrt{2g_3H}$ として求めた．

時間積分には predictor-corrector 法¹⁰⁾を用い，時間ステップ dt には

$$dt = \alpha \frac{d_0}{c_0} \quad (23)$$

で $\alpha \leq 0.25$ を用いた．

Non-slip 境界条件として，2 層の境界粒子を用いた．境界粒子では，式 (21), (22) を用いて密度と圧力のみ更新し，位置・速度・質量は不変とする．

(2) SPH プログラムへの並列計算手法の実装

大規模問題に適用するため，分散メモリ型並列プログラムを開発する．解析領域を空間的に分割し，各プロセッサがそれぞれの小領域に含まれる粒子の計算を行い，逐次，境界を接する小領域間で境界付近での粒子の圧力・流速等の情報を通信することで並列計算を行う²³⁾．本研究では，k-d 木²⁴⁾を用いて解析領域を 2 次元的に分割する．ここでは，各領域に含まれる流体粒子数 n_i が同程度となるよう，領域を x, y 方向に交互に分割する(図-7 参照)．各領域に含まれる流体粒子数の比率

$$R = \frac{\min_i n_i}{\max_j n_j} \quad (24)$$

が一定値 R_0 以下になったら解析領域を再度分割することで，各プロセッサが受け持つ流体粒子数を均一にしている．本研究では $R_0 = 0.97$ を用いている．近傍粒子探索には cell 法²⁵⁾(cell の大きさには $2.5h$) を用い，プログラムの記述には c++ を使った．

表-1 数値検証の解析諸元．

流体物性	密度	ρ_0	$1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	動粘性係数	ν_0	$1.0 \text{ m}^2/\text{s}$
解析諸元	時間ステップ間隔	dt	0.0125 s
	初期粒子配置間隔	d_0	1.0 m
	smoothing length	h	1.2 m

図-8 Couette 流れの解析結果．実線は解析解，点は解析結果を表す．

(3) SPH プログラムの数値検証

開発した SPH プログラムを使って Couette 流れと Poiseuille 流れを解析し，解析解²⁶⁾と比較する．双方の解析とともに周期境界条件を使い，表-1 の物性と解析諸元を使って解析した．いずれの場合もレイノルズ数 $Re = 20$ である．

Couette 流れ：層間 20m ($z = 0, 20\text{m}$) の二つの板の間に流体を配置し， $z = 20\text{m}$ 側の板を板面平行方向に一定速度 $v = 1.0\text{m/s}$ で動かす問題を解く．初期粒子配置間隔 $d_0 = 1\text{m}$ で離散化を行った場合の終端速度 v_∞ の分布を図-8 に示す．図から，解析解と良い一致を示していることが分かる．解析解との誤差は $z = 19\text{m}$ で最大となり，相対誤差は 0.32% となっている．

Poiseuille 流れ：層間 20m ($z = 0, 20\text{m}$) の二つの板の間に流体を配置し，流体に板面平行方向に加速度 $a = 0.02\text{m/s}^2$ をかけ，物体力と壁面との摩擦が釣り合う終端速度 v_∞ を求める．初期粒子配置間隔 $d_0 = 1\text{m}$ で離散化した場合の終端速度分布の解析結果を図-9 に示す．図から，解析解と良い一致を示していることが分かる．解析解との誤差は $z = 10\text{m}$ で最大となり，相対誤差は 1.53% となっている．

以上から，開発した SPH プログラムによる解析結果は低レイノルズ数領域 ($Re \approx 10^1$) で解析解と良い一致を示すことが分かった．なお，津波の最大流速 $U = 10\text{m/s}$

図-9 Poiseuille 流れの解析結果．実線は解析解，点は解析結果を表す．

表-2 津波解析の解析諸元

流体物性	密度	ρ_0	$1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	動粘性係数	ν_0	$1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
解析諸元	時間ステップ間隔	dt	0.00125s
	初期粒子配置間隔	d_0	1.0m
	smoothing length	h	1.2m
	粒子数 (流体)	n_f	1,077,670
	粒子数 (境界)	n_b	1,670,434

と見積もると，レイノルズ数は最大で

$$Re = \frac{UL}{\nu_0} \simeq \frac{10\text{m/s} \times 1\text{m}}{10^{-6}\text{m}^2/\text{s}} = 1.0 \times 10^7 \quad (25)$$

となる．高レイノルズ数におけるプログラムの検証は別途必要であり，今後の課題である．

5. 津波解析への適用例

津波解析の一例として，自動構築した都市モデルを用いて数値実験を行う．この数値実験の目的は，構築された都市モデルが粒子法による高分解能な津波解析に適用できることを確認することである．

入力となる都市モデルには，高知市の DMD タイル (N-14.dm) を用いて構築した粒子間隔 1m，大きさ $800 \times 600\text{m}$ の都市モデルを使う．解析領域の一端に幅 300m，深さ 10m の水塊を設置し，ダムブレイク問題を解く．実際の津波現象と比べ，極度に簡略化した問題設定ではあるが，都市モデルの津波解析への適用性の確認を行うには十分である．解析諸元を表-2 にまとめた．解析には 32 個のプロセッサを使い，20,000 ステップの計算に 14.5 時間かった．

図-10 は解析領域全体のスナップショットである．

marching cubes 法²⁷⁾を使って密度の等値面を可視化している．色は流速を表す．図から，時系列に沿って左手から右手に流体が流れていくのがわかる．図-11 は津波先端部での流れの詳細図である．図から，建物を乗り越えたり，回り込むような流れが確認できる．なお，建物を貫通するような不自然な流れは見られなかった．これらの結果から，建物形状が津波解析に反映されていることが分かる．また，建物と地面の隙間から都市モデルの下に粒子が漏れ出るような現象は見られず，境界粒子に隙間がない都市モデルが作成されていることが確認できた．ここから，構築した都市モデルが粒子法による津波解析の入力として十分使えることがわかった．

津波解析の妥当性については，都市モデルの入力となる DMD 及び津波の入力波に大きく依存する．これらの項目を含めた津波解析の妥当性の検証については今後の課題である．

6. おわりに

本研究では，INDS に高分解能な津波解析 (HRTS) を組み込むことを目的に，2 次元 GIS データである DMD を入力に，粒子法による高分解能な津波解析に適用できる都市モデル構築手法を開発した．都市モデル構築手法の拡張性・汎用性を高めるため，入力となる GIS データを直接都市モデルに変換せずに，CMD を経由するように 2 段階に分けて変換を行った．

DMD は元来 2 次元平面に投影して数値地図として使うものであり，3 次元情報からなる都市モデルに変換するには標高データの補間が必要であった．従来対話的に行われていた等高線の標高同定作業を自動化するアルゴリズムを開発することで，山岳地域のような等高線が密である区域においては 77%，等高線が疎である区域では 36%の等高線の標高を正しく推測することができた．決して高い変換率ではないが，標高データの荒い近似としては使うことができる．建物データの自動変換手法と合わせることで，標高と建物の外形形状からなる都市モデルを自動構築することができるようになった．

開発した分散メモリ型並列 SPH プログラムを使った津波解析では，建物形状が数値解析に反映されており，構築した都市モデルが津波解析に十分利用できることがわかった．得られた津波解析の結果の妥当性・並列計算の性能の確認については今後の課題である．

本研究で開発した都市モデル構築手法は都市における高分解能な高潮解析や洪水解析にも適用できる．HRTS の実現に向けて，梁・柱などの構造部材の形状・物性のモデル化と，大規模問題に適用できる流体・固体連成

$t = 0s$

$t = 10s$

$t = 20s$

図-10 津波解析の解析結果． t は計算開始からの経過時間を表す．

$t = 0s$

$t = 5s$

$t = 10s$

図-11 津波解析の解析結果の詳細図． t は計算開始からの経過時間を表す．

破壊解析手法の開発が課題である．

謝辞：本研究を行うに際し，高知県から GIS データを提供していただいた．ここに感謝の意を表す．

参考文献

- 1) 土木学会東日本大震災特別委員会総合調査団 調査速報会報告，土木学会誌，Vol.96, No.6, pp.4-27, 2011.
- 2) Hori, M. and Ichimura, T.: Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster, *Journal of Seismology*, Vol.12, pp.307-321, 2008.
- 3) 堀宗朗，田中謙吾，Sobhaninejad, G., 市村強，小國健二：自然災害シミュレーションのための GIS から都市モデルへの汎用的データ変換，土木学会論文集 A，Vol.66, No.1, pp.1-12, 2010.
- 4) 上戸恭介，堀宗朗，市村強，Wijerathne, M. L. L.: 統合自然災害シミュレーションのための堅牢性の高い都市モデ

ル構築手法の開発，土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学)，Vol.67, No.2, L451-L460, 2011.

- 5) Hori, M.: *Introduction to computational earthquake engineering, 2nd Edition*, Imperial College Press, London, 2011.
- 6) Wijetunge, J. J., Numerical simulation and field survey of inundation due to 2004 Indian Ocean tsunami in Trincomalee, Sri Lanka, *Natural Hazards*, Vol.54, No.1, pp.177-192, 2010.
- 7) 油屋貴子，今村文彦：合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案，海岸工学論文集，Vol.49, pp.276-280, 2002.
- 8) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，Vol.45, pp.356-360, 1998.
- 9) 堀宗朗，宮嶋宙，犬飼洋平，小国健二：地震時避難行動予測のためのエージェントシミュレーション，土木学会論文集 A，Vol.64, No.4, pp.1017-1036, 2008.12.
- 10) Monaghan, J. J.: Simulating free surface flows with SPH, *Journal of computational physics*, Vol. 110, pp.399-406,

- 1994.
- 11) Monaghan, J. J.: On the problem of penetration in particle methods, *Journal of computational physics*, Vol. 82, Issue 1, pp.1-15, 1989.
- 12) 浅井光輝, 林高德, 杉隆紀, 園田佳巨, 酒井譲: 数値地図による沿岸地域モデリングと SPH 粒子法による流体解析, 計算工学講演会論文集, Vol.14, 2009.
- 13) 安田誠宏, 平石哲也, 永瀬恭一, 島田昌也: 流体直接解析法による臨海部の浸水リスク解析, 海岸工学論文集, Vol.50, pp.301-305, 2003.
- 14) 安田誠宏, 平石哲也: 臨海部の複層都市空間における MARS 法を用いた高精度な浸水解析, 港湾空港技術研究所報告, Vol.43 No.2, pp.1-32, 2004.
- 15) 今村文彦, 藤原誠, 進藤一弥, 市村強: 臨海都市域に襲撃する津波の統合シミュレーションの開発, 海岸工学論文集, Vol.51, pp.291-295, 2004.
- 16) 杉原健一, 林良嗣: 3次元建物モデルの自動生成のための一般建物ポリゴン分割法, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.67-74, 2006.
- 17) Wise, S.: *GIS Basics*, CRC Press, 2002.
- 18) Carrara, A., Bitelli, G. and Carla', R.: Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.11, No.5, pp.451-473, 1997.
- 19) Wang, D., Tian, Y., Gao, Y. and Wu, L.: A new method of generating grid DEM from contour lines, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings*, 2005 IEEE International, pp.657-660, 2005.
- 20) Song, D., Yue, T. and Du, Z.: DEM Construction from Contour Lines Based on Regional Optimum Control, *2010 Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization (CSO)*, pp.162-165, 2010.
- 21) Briggs, I. C.: Machine contouring using minimum curvature, *Geophysics*, Vol.39, No.1, pp.39-48, 1974.
- 22) Lo, E. Y. M. and Shao, S.: Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method, *Applied Ocean Research*, Vol.24, pp.275-286, 2002.
- 23) Ferrari, A., Dumbser, M., Toro, E. F. and Armanini, A.: A new 3D parallel SPH scheme for free surface flows, *High Performance Computing on Vector Systems 2009*, pp.179-188, 2010.
- 24) 伊理正夫監修, 腰塚武志編集: 計算幾何学と地理情報処理 第2版, 共立出版, 1993.
- 25) Gesteira, M. G., Rogers, B. D., Dalrymple, R. A., Crespo, A. J. C. and Narayanaswamy, M.: User Guide for the SPHysics code, <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/>, 2010.
- 26) Morris, J. P., Fox, P. J. and Zhu, Y.: Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH, *Journal of computational physics*, Vol. 136, Issue 1, pp.214-226, 1997.
- 27) Bourke, P.: Polygonising a scalar field, paulbourke.net/geometry/polygonise/, 1994.

(2011.12.14 受付, 2012.2.22 修正, 2012.3.6 受理)

CONVERSION OF GIS DATA TO CITY MODEL FOR PARTICLE BASED HIGH RESOLUTION TSUNAMI SIMULATION

Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI,
MADDEGEDARA Lakshman Lalith Wijerathne and Seizo TANAKA

We develop a method that converts elevation and building data stored in GIS (Geographic Information System) to a city model that can be applied to high resolution tsunami simulation using particle based numerical methods. We use DMD (Digital Mapping Data); a two-dimensional GIS data format as an input, and convert it to a city model constructed from particles. In order to use the two-dimensional GIS data as an input for a three-dimensional city model, we develop an algorithm to supplement elevation data stored in DMD. In order to demonstrate the usage of the city model, we develop a SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) code and apply it to the city model for tsunami simulation. In the results, building shapes are reflected properly in the numerical simulation, showing that the city model is applicable to tsunami simulation.