

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, 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 東京大学大学院工学系研究科 (〒 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) 上に蓄えられた地形・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や建物壁面の形状を表す都市モデルを構築する。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、粒子法の一種である 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、建物を乗り越えたり、回り込むような流れを見ることができ、建物形状が数値解析に反映されていることが確認できた。

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

1. はじめに

津波被害の予測・軽減のため、津波解析が研究されている。ここで言う津波解析とは、地理情報システム (Geographic Information System, GIS) 上に蓄えられたデータから作成した都市モデルを使って津波の流れを数値計算することで、都市域の津波被害を定量的に予測するものである。現在広く使われている津波解析では、浸水範囲の予測を広域で行うことを目的に、浅水長波理論に基づいた数値解析が使われている (例えば、¹⁾など)。このような津波解析では、建物一軒一軒をモデル化することはせずに、建物群を等価な粗度係数として近似した都市モデルを使っている。一方で、より高分解能な津波解析の実現を目指し、数値地図の標高データを使った都市モデルに 3 次元数値流体解析を適用する手法も研究されている (例えば、²⁾など)。

建物の破壊やがれきの漂流などの津波被害を予測するには、破壊・漂流解析を含んだ高分解能な津波解析が必要となる。このような津波解析を行うには、標高と建物の物性・詳細形状を反映した都市モデルを構築し、これに流体・固体連成破壊解析を適用する必要がある。このような津波解析の実現に向けて、本研究では、標

高及び建物の外形形状を反映させた都市モデル構築手法を開発する。GIS データの一種である DMD(Digital Mapping Data) を入力に、自由表面や分岐・合流などの複雑な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都市モデルを構築する。

構築した都市モデルが津波解析に適用できることを確認するため、粒子法の一種である、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 法^{3),4)}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。なお、本研究のように高解像度で 3 次元的に支配方程式を離散化する場合、数値解析の問題規模が大きくなる。これに対応するため、分散メモリ型の並列解析プログラムを開発する。

2. 解析手法

(1) 都市モデル構築手法

GIS 上に蓄えられたデータと既存の数値解析プログラムを有効活用するため、都市モデル構築手法は、複数の GIS データ形式に対応でき、使用する数値解析プログラムに応じて複数の形式の都市モデルが構築することが重要である。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。 N 種の GIS データを中間モデルデータ (Common Modeling Data, CMD)^{5),6)} に変換したうえで、 M 種の都市モデルに変換する方法を使うことで、変換プログラムの数を $N + M$ 個に減らすことができ、変換プログラムの再利用が可能となる。各種のデータ形式を格納するため、CMD には節 (Node) と接続情報 (Connectivity) からなる Shape と、空間を格子状に区分し、格子ごとにデータを格納する Grid がある。

本研究では日本の主要都市で整備されている CAD 準拠の 2 次元 GIS データ形式である DMD を入力とし、標高 Grid に変換する手法を開発する。さらに、標高 Grid と建物 Grid を入力に、粒子からなる都市モデルを構築する手法を開発する。標高 Grid とは、 $x-y$ 平面を格子状に区切り、各格子の中心の座標での標高 (z 座標) を格納したものであり、建物 Grid とは、各格子の中心の座標での建物高さ h を格納したものである。建物 Grid において、格子の中心座標に建物がない場合、 $h = 0$ となっている。

a) DMD の標高データから標高 Grid への変換

DMD において標高データは等高線からなる線分列のデータと、基準点を表す点のデータからなっている。等高線は、 x, y 座標の点列として記録されており、基準点は x, y, z 座標の点として記録されている。本研究では、 z 座標を持った基準点から等高線の z 座標を推測したうえで、 z 座標を持った等高線を用いて標高 Grid を作成する。

まず、等高線の z 座標を推測する。重複する等高線を削除し、端点の一致する等高線を接続したのち、以下の手順で等高線の z 座標を推測する。区別のため、 z 座標を持たない等高線は「等高線」、 z 座標を持った等高線は「標高線」と呼ぶ。

- すべての基準点 p_i に対し、 p_i から一番近い等高線に p_i の z 座標を与える。(図-1.a)
- すべての標高線 l_i に対し、その z 座標 z_i より z 座標の小さい標高線のうち、 l_i との距離が一番短い標高線 $l_{j(i)}$ を取り出す。該当する標高線がない場合はその標高線 l_i を飛ばす(何もしない)。 l_i と $l_{j(i)}$ 間で一番近い 2 点を結ぶ線分 L_i を引く。(図-1.b)
- すべての線分 L_i に対し、交差する等高線の数 n_i 、等高線の z 方向の刻み幅を dz 、 $l_{j(i)}$ の z 座標を $z_{j(i)}$ としたとき、

$$(n_i + 1)dz = z_i - z_{j(i)}$$

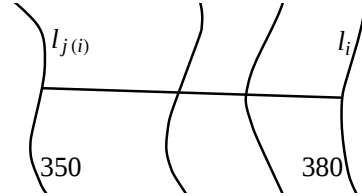
となれば、線分と交わる n_i 本の等高線に z 座標を l_i に近いほうから順に

$$z = z_i - \alpha dz \quad \alpha = 1, 2, \dots, n_i$$

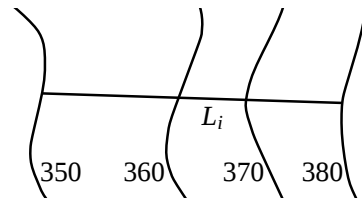
と与える。線分数と標高差が整合しない場合はそ



a) 基準点が一番近い等高線に標高を与える



b) l_i と $l_{j(i)}$ 間で一番近い 2 点を結ぶ線分を引く



c) L_i に交差する線分を数え、標高差と整合すれば標高を与える

図-1 等高線の z 座標の推測手法

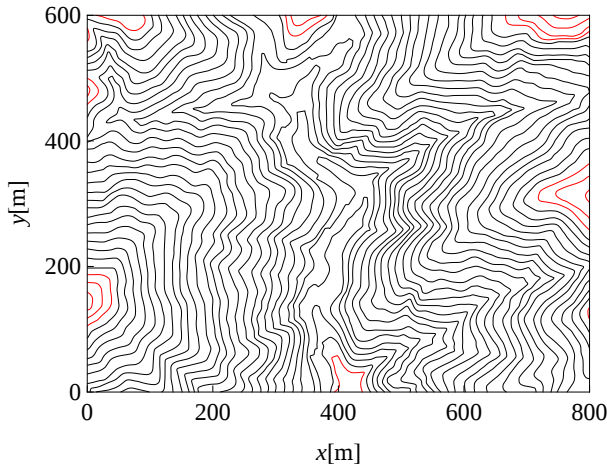
の線分 L_i は飛ばす(何もしない)。(図-1.c)

以上の推測アルゴリズムを用いて、高知市の DMD の変換を行った。データ変換の堅牢性の指標として、上記のアルゴリズムで正しく標高が推測された等高線の数割合

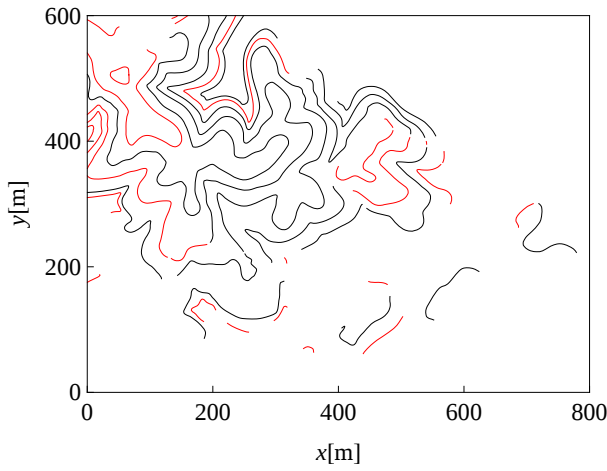
$$R = \frac{N}{N_0} \times 100 (\%)$$

を使う。ここで、 N は正しく標高が推測された等高線の数、 N_0 は入力となる DMD タイルに含まれている等高線の数である。図-2.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。次に、等高線の数が少ない DMD タイル (I-15.dm) の変換結果を図-2.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数は少なくなっていることが分かる。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。

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。ここでは、標高線を z 座標既知の点群とみなし、minimum curvature 法⁷⁾、及び、最短距離法を用いて Grid を構成する格子の中心点の z 座標を補完する。



a) 0A-00.dm



b) I-15.dm

図-2 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．

Minimum curvature 法は $x-y$ 面内の曲率の積分

$$E = \int \left(\frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{d^2 z}{dy^2} \right)^2 dx$$

が最小となるように関数 $z(x)$ を求める方法である．ここで， x は $x-y$ 平面内での位置を表す．当然，関数 $z(x)$ は，

$$z(x_i) = z_i$$

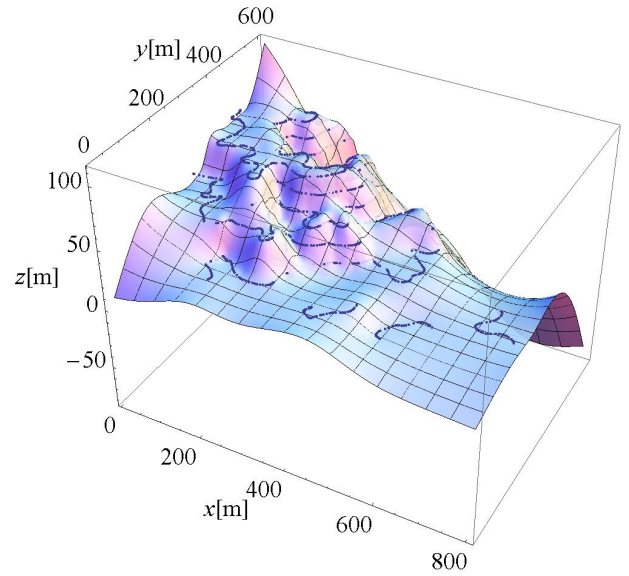
を満たすようにする． x_i, z_i は標高が既知の第 i 番目の点での $x-y$ 面内の位置と z 座標である．

最短距離法は $x-y$ 面内の距離 $|x - x_i|$ が最小となる標高既知の第 i 番目の点での z 座標 z_i を用いて，

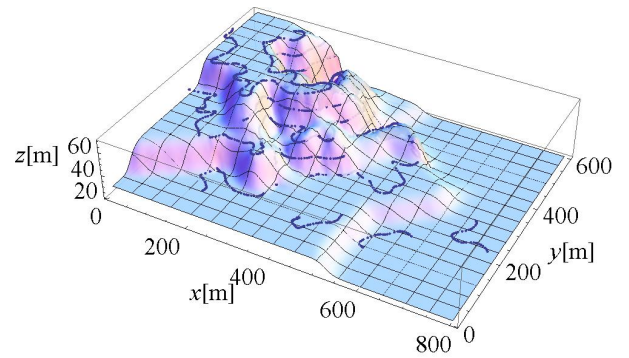
$$z(x) = z_i$$

とする方法である．このままでは関数に不連続面が生じてしまうため，関数 $z(x)$ の格子点 (i, j) での値 z_{ij} を用いて，

$$z'_{ij} = \frac{1}{9} \sum_{i' \in I, j' \in J} z_{i'j'}$$



a) minimum curvature 法



b) 最短距離法

図-3 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．

として平滑化した値 z'_{ij} を用いる．ここで，

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

である．

図-3 は I-15.dm の変換結果である．図-3.a) から，minimum curvature 法を使った場合，タイルの外周部で大きく関数 $z(x)$ 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-3.b) では外周部において関数 $z(x)$ は平らになっている．標高線の数が多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．

b) Grid から粒子からなる都市モデルへの変換

標高 Grid と建物 Grid を，粒子法による数値解析に使う都市モデルに変換する．なお，建物 Grid は，DMD の建物データを建物 Grid に変換する手法⁶⁾を使って作成した．

粒子法による流体解析では，壁面や地面などの境界

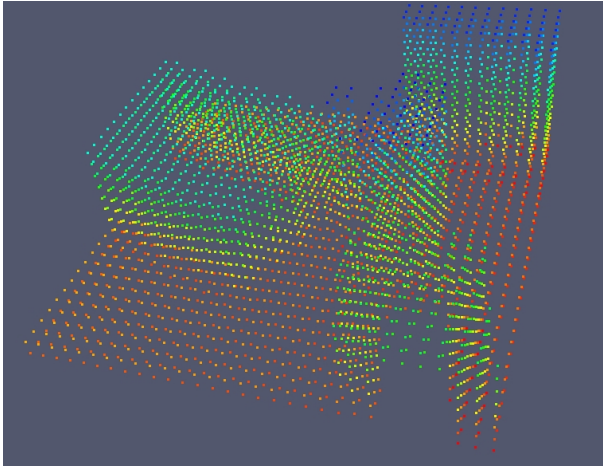


図-4 粒子からなる都市モデルの変換結果

面を境界粒子を用いてモデル化する．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．

本研究では，すべての格子点 (i, j) に対し，

$$\mathbf{X} = (x_i, y_j, Z_{ij} - \alpha d_0)$$

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

に境界粒子を配置する．ここで， $\mathbf{X}$ は 3 次元座標， $\lfloor \cdot \rfloor$ は床関数， d_0 は粒子の配置間隔， 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，

$$Z_{ij} = z_{ij} + h_{ij}$$

である．また，

$$I = \{i - n_0, i - n_0 + 1, \dots, i + n_0\}$$

$$J = \{j - n_0, j - n_0 + 1, \dots, j + n_0\}$$

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-4 に示す．ここでは，高知市の DMD タイル N-14.dm のうち，大きさ $100 \times 100\text{m}$ の区域を示している．境界には粒子を 2 層使っている．図から，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わかる．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．

(2) 流体解析手法

a) SPH

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) 法を用いる．WCSPH 法の

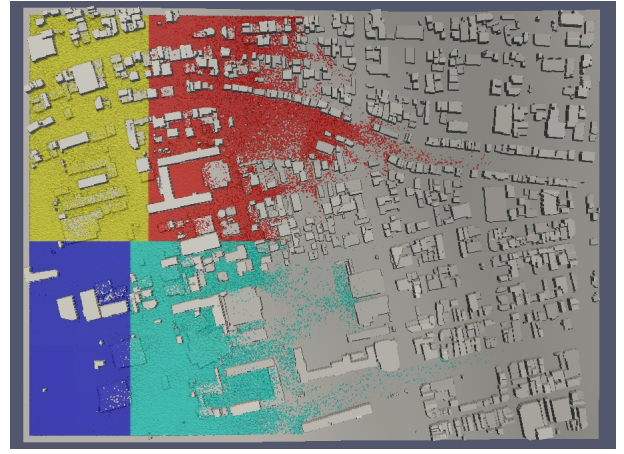


図-5 2 次元 tree 法による解析領域の領域分割．色は領域分割を表す．各領域に含まれる流体粒子が同程度となるように x, y 方向に交互に分割する．図は，4 つの領域に分割した場合を表す．

詳細は文献³⁾に詳しい．Kernel 関数には cubic spline を用い，smoothing length h には， $h = 1.2d_0$ (d_0 : 初期粒子配置間隔) を使った．粒子位置の更新には XSPH correction⁴⁾ を使い，状態方程式は

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

を使った．ここで， $\gamma = 7$ ， p は圧力， ρ は密度， 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， $c_0 = 10 \max |\mathbf{v}|$ となるように設定した． $\mathbf{v}$ は粒子の速度である．時間積分には Predictor-corrector 法³⁾を用い，時間ステップ dt には $dt = \alpha d_0 / c_0$ ， $\alpha \leq 0.25$ を用いた．Non-slip 境界条件として，2 層の固定境界粒子を用いた．

b) SPH の実装と並列化

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通信を行うことで並列計算を行う⁸⁾．本研究では，解析領域の領域分割に，解析領域を 2 次元的に分割する方法の一種である 2 次元 tree 法を用いる．各領域に含まれる粒子数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-5 参照)．各領域に含まれる粒子数の比率

$$R = \frac{\min_i n_i}{\max_j n_j}$$

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粒子数を均一にならしている．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⁹⁾ (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	ρ_0	$1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
	ν_0	$1.0 \text{m}^2/\text{s}$
解析諸元	dt	0.0125s
	d_0	1.0m
	h	1.2m

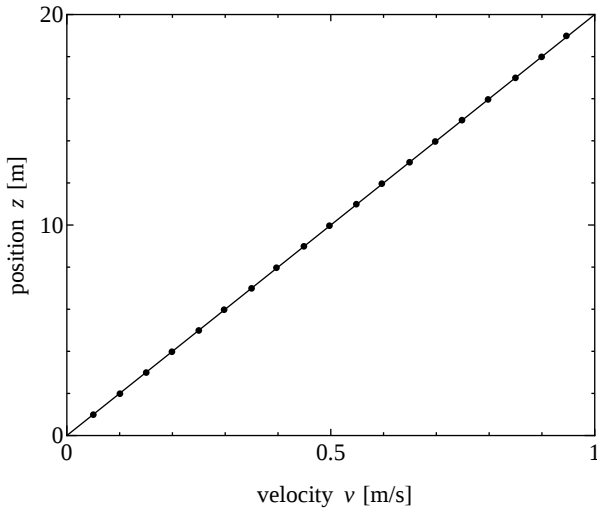


図-6 Couette 流れの解析結果 . 実線は解析解 , 点は解析結果を表す .

c) 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¹⁰⁾と比較・検証する . 双方の解析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 .

Couette 流れ : 層間 20m ($z = 0, 20$) の二つの板の間に流体を配置し , $z = 20$ 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 . 初期粒子配置間隔 $d_0 = 1 \text{m}$ のときの終端速度 v_∞ の分布を図-6 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 .

Poiseuille 流れ : 層間 20m ($z = 0, 20$) 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 $d_0 = 1 \text{m}$ のときの終端速度分布の解析結果を図-7 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 . 解析解との相対誤差は $z = 10$ で 1.53% となっている .

3. 津波解析への適用例

津波解析の一例として , 2 節の手法で構築した都市モデルを用いて数値実験を行う . 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 800×600m 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

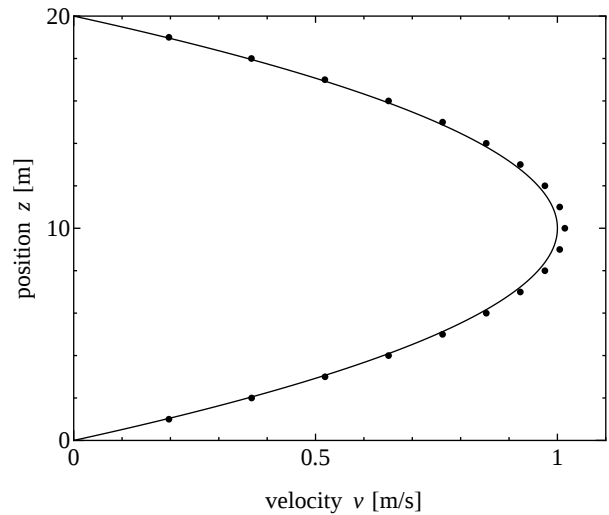


図-7 Poiseuille 流れの解析結果 . 実線は解析解 , 点は解析結果を表す .

表-2 津波解析の解析諸元

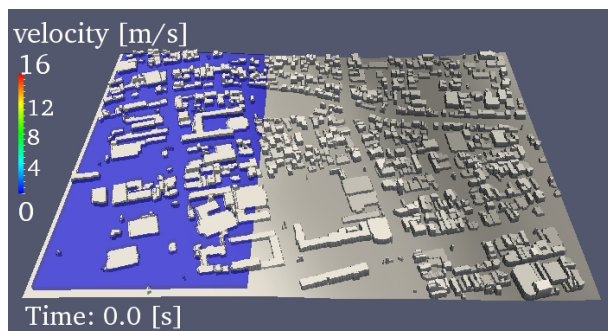
流体物性	ρ_0	$1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
	ν_0	$1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
解析諸元	dt	0.00125s
	d_0	1.0m
	h	1.2m
	粒子数 (流体)	1,077,670
	粒子数 (境界)	1,670,434

置し , ダムブレイク問題を解く . 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 .

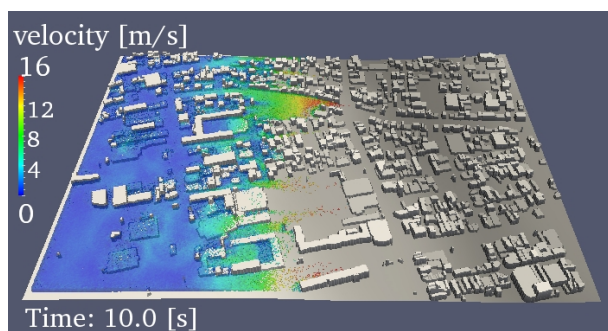
図-8 は解析領域全体のスナップショットである . marching cubes 法¹¹⁾を使って密度の等値面を可視化している . 図から , 時系列に沿って左手から右手に流体が流れていくのがわかる . 図-9 は津波先端部での流れの詳細図である . 図から , 建物を乗り越えたり , 回り込むような流れが確認できる . なお , 建物を貫通するような不自然な流れは見られなかった . これらの結果から , 建物形状が津波解析に反映されていることが分かる .

4. おわりに

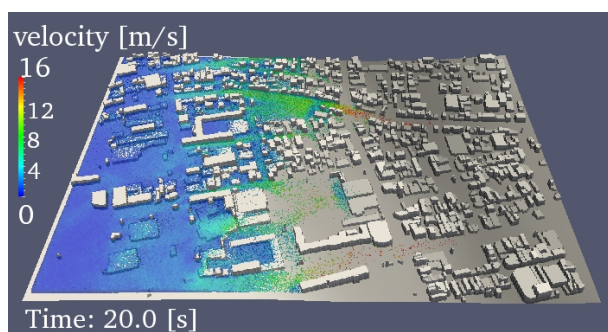
本研究では , 粒子法による高分解能な津波解析に適用できる都市モデル構築手法を開発した . 2 次元 GIS データである DMD を都市モデルの入力として使うため , 標高データの補完を行い , これを粒子からなる都市モデルに変換した . 開発した分散メモリ型並列 SPH プログラムを使った津波解析例では , 建物の周りを流れたり乗り越えるような流れを見ることができ , 建物形状が数値解析に反映されていることを確認した . 本研究で開発した都市モデル構築手法及び並列 SPH プロ



$t = 0\text{s}$

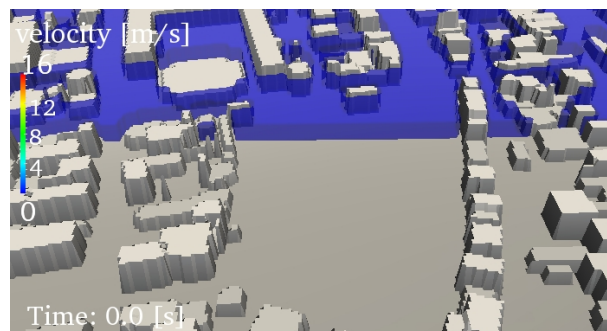


$t = 10\text{s}$

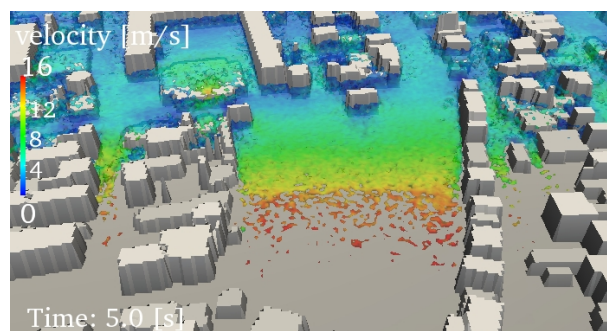


$t = 20\text{s}$

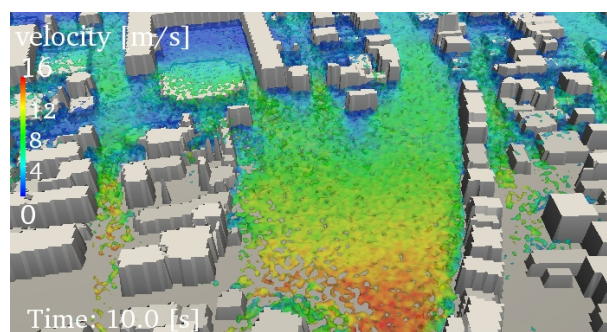
図-8 津波解析の解析結果． t は計算開始からの経過時間を表す．



$t = 0\text{s}$



$t = 5\text{s}$



$t = 10\text{s}$

図-9 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．

グラム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．高分解能な津波解析に向けて、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・固体連成破壊解析手法の開発が課題である．

謝辞：本研究に際し、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る．

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

- 3) Monaghan, J. J.: Simulating free surface flows with SPH, *Journal of computational physics*, Vol. 110, pp.399-406, 1994.
- 4) Monaghan, J. J.: On the problem of penetration in particle methods, *Journal of computational physics*, Vol. 82, Issue 1, pp.1-15, 1989.
- 5) 堀宗朗, 田中謙吾, Sobhaninejad Gholamreza, 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.
- 6) 上戸恭介, 堀宗朗, 市村強, Lalith Wijerathne: 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, I.451-I.460, 2011.
- 7) Briggs, I.C.: Machine contouring using minimum curvature, *Geophysics*, Vol.39, No.1, pp.39-48, 1974.
- 8) Ferrari, A., Dumbser, M., Toro, E. F., Armanini, A.: A new 3D parallel SPH scheme for free surface flows, *High Performance Computing on Vector Systems 2009*, pp.179-188,

- 2010.
- 9) Gesteira, M. G., Rogers, B. D., Dalrymple, R. A., Crespo, A. J. C., Narayanaswamy, M.: User Guide for the SPHysics code, <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/>, 2010.
- 10) Morris, J. P., Fox, P. J., Zhu, Y.: Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH, *Journal of computational physics*, Vol. 136, Issue 1, pp.214-226, 1997.
- 11) Paul Bourke: Polygonising a scalar field, paulbourke.net/geometry/polygonise/, 1994.

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

Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI, 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 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 of the simulation, the tsunami flows over and around the buildings; showing that building shape is reflected properly in the numerical simulation.