

避難行動シミュレーションと統合するための津波災害シミュレーションにおける建造物との相互作用

Interaction between Tsunami and Buildings to integrate with Evacuation Behavior Simulation

尾崎俊輔[†], 飯島正[†]

Shunsuke OZAKI[†], and Tadashi IJIMA[†]

[†]慶應義塾大学大学 理工学部

[†]Science and Technology, Keio Univ.

要旨

日本では数多くの自然災害が発生している。地方自治体は、自然災害から被災者を守り、被害を低減させるための災害対策/避難計画を立案・改善することが急務とされている。避難行動シミュレーションのためには、物理的な災害シミュレーションとの融合が不可欠である。本研究プロジェクトでは、粒子法による陸上の津波災害シミュレーションに建造物との衝突と破壊等の相互作用を含める試みについて報告する。

1. はじめに

現在、地方自治体は、自然災害から被災者を守り、被害を低減させるための災害対策/避難計画を立案・改善することが急務とされている。その際に事前に津波や洪水が発生した時の動きをシミュレーションすることは沿岸地域や河川周辺地域の被害を減らすために重要である。しかし建造物との衝突と破壊を取り入れているシミュレーションは少ない。本研究プロジェクトでは、粒子法による陸上の津波災害シミュレーションに建造物との衝突と破壊等の相互作用を含める試みについて報告する。地理情報としては、国土地理院が発行する基盤地図情報と数値地図（国土基本情報）を利用している。

2. 物理シミュレーションの手法

物理シミュレーションの手法としては粒子法のSPH法を用いる。粒子法とは物体を一定の大きさの粒子の集まりで表現する手法であり、各粒子に速度や密度などの物理量を変数として配置する。SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法はLucyが宇宙物理学におけるシミュレーションのために開発した手法で陽的なアルゴリズムである。密度を周囲の粒子の重み付き合計で表し、状態方程式で圧力を求める。これらはカーネル関数の重ね合わせで空間分布を構築する。水と地形及び水と建造物の境界条件としてはペナルティ法を用いる。ペナルティ法とは拘束条件を破った場合に数値的なペナルティとして与えることで近似解を求める方法である。

3. SPH法

3.1. カーネル関数の重ね合わせ

SPH法による物理量 A の離散化式は以下ようになる

$$A(r) = \sum_{j=1} m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(r - r_j, h) \quad (1)$$

ここで m は粒子質量, ρ は粒子密度, W はカーネル関数である。 h はカーネル関数の有効半径であり、有効半径外では0となる。そして

$$\int W dr = 1 \quad (2)$$

のように積分が1となる。SPH法では粒子間の距離による影響力をカーネル関数を用いることで近似をする。またSPH法では物理量 A の勾配 ∇A やラプラシアン $\nabla^2 A$ をカーネル関数の勾配やラプラシアンと物理量の積の積分により表すことができる。これにより物理量 A の勾配とラプラシアンは以下のようになる

$$\nabla A(r) = \sum_{j=1} m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla W(r - r_j, h) \quad (3)$$

$$\nabla^2 A(r) = \sum_{j=1} m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla^2 W(r - r_j, h) \quad (4)$$

3.2. カーネル関数

近似に用いるカーネル関数は Muller[1] が提案した poly6,kSpiky,Viscosity の 3 種類のカーネルを用いる. poly6 カーネルは密度の計算,Spiky カーネルは圧力の計算,Viscosity カーネルは粘性力の計算にそれぞれ用いる.

3.3. 支配方程式の離散化

本手法では支配方程式として非圧縮性流体の質量保存則の連続の式と, 流体の運動量保存則である Navier-Stokes 方程式を用いる. それぞれ以下のような式になる.

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f \quad (6)$$

ρ, v, p, μ, f はそれぞれ密度, 速度ベクトル, 圧力, 粘性係数, 外力である. NavierStokes 方程式の右辺の $-\nabla p, \mu \nabla^2 v, f$ はそれぞれ圧力項, 粘性項, 外力項である. これらをそれぞれ解くことによって加速度を求める. 以下で圧力項, 圧力項, 粘性項についてそれぞれ述べる.

3.4. 圧力項の離散化

圧力項は圧力値の勾配で構成され, 粒子間に働く圧力の影響を示す圧力項は Muller の手法により以下の式のように表す.

$$f_i^p = -\nabla p = -\sum_j m_j \frac{p_j}{\rho_j} \nabla W_s(r_i - r_j, h) \quad (7)$$

ここで p_j は粒子 j の圧力である. しかしこの式では粒子 i から j に与える力と粒子 j から i に与える力が異なり非対称になってしまう. そこで粒子間の力を対象にするために粒子 i, j の圧力の平均値を用いて以下の式のように表す.

$$f_i^p = -\nabla p = -\sum_j m_j \frac{p_j + p_i}{2\rho_j} \nabla W_s(r_i - r_j, h) \quad (8)$$

3.5. 粘性項の離散化

粘性とは流体内の速度を一様にする方向に働く力のことであり, 粘性項は流体の速度により構成される. 粘性項は Muller の手法により以下の式のようにあらわす.

$$f_i^v = \mu \nabla^2 v = \mu \sum_j m_j \frac{v_j - v_i}{\rho_j} \nabla W_v(r_i - r_j, h) \quad (9)$$

ここで μ_j は粒子 j の粘性係数である.

3.6. 外力項の離散化

ここでは表面張力と人口粘性二つの外力について述べる

3.6..1 表面張力

表面張力とは流体が気体と接している面に生じる力のことであり. 力の方向は流体内部に向かい, 流体表面に対して垂直な向きとなる. 流体の運動は表面張力の影響を受け, 表面積が最小である球形になろうとする. 表面付近の粒子にかかる表面張力 f_s は以下のようなになる.

$$f_s = \sigma k(r)n(r) = -\sigma \nabla^2 C(r) \frac{n(r)}{|n(r)|} \quad (10)$$

ここで σ は表面張力係数である. 表面付近の粒子に外力項として表面張力 f_s を加算することで表面張力を考慮した粒子の運動を得られる.

3.6..2 人工粘性

粒子の運動にすり抜けが起こらないようにするために加える力が人工粘性である。2つの粒子の相対速度と重心の位置ベクトルの差を求める。

$$v_{ij} = v_i - v_j \quad (11)$$

$$d_{ij} = r_i - r_j \quad (12)$$

v_{ij} は粒子 j に対する粒子 i の相対速度を表し、 d_{ij} は粒子 i と j の重心の位置ベクトルの差である。粒子にかかる人工粘性を f_a とすると人工粘性 f_a は以下のようになる。

$$f_a = \begin{cases} \frac{-Ac_{ij}\theta_{ij} + B\theta_{ij}^2}{\rho_{ij}} & (v_{ij}d_{ij} < 0) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (13)$$

ここで $\theta_{ij}, c_{ij}, \rho_{ij}, h_{ij}$ は以下のようになる。

$$\theta_{ij} = \frac{h_{ij}(v_{ij}d_{ij})}{|d_{ij}|^2 + Ch_{ij}} \quad (14)$$

$$c_{ij} = \frac{1}{2}(c_i + c_j) \quad (15)$$

$$c_i = \sqrt{\frac{K}{\rho_i}} \quad (16)$$

$$\rho_{ij} = \frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j) \quad (17)$$

$$h_{ij} = \frac{1}{2}(h_i + h_j) \quad (18)$$

3.7. 速度と座標の更新

以上のようにして求めた力を用いて粒子の速度を以下のように更新する。

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + \frac{\Delta t}{\rho_i}(f_i^p + f_i^v + f_i) \quad (19)$$

ここで $v(t), f_i^p, f_i^v, f_i, \Delta t$ はそれぞれ時刻 t における粒子 i の速度、圧力、粘性力、外力、タイムステップである。時刻 $t + \Delta t$ における粒子速度 $v_i(t + \Delta t)$ を用いて時刻 $t + \Delta t$ における粒子座標 $r_i(t + \Delta t)$ は以下のようになる。

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t + \Delta t)\Delta t \quad (20)$$

このようにして粒子に働く力、速度、座標を計算し更新、そしてこの処理を繰り返すことによって粒子の運動を表現する。

4. 提案

4.1. 提案の概要

本研究プロジェクトでは、粒子法による陸上の津波災害シミュレーションに建造物との衝突と破壊等の相互作用を含めることを提案する。

4.2. シミュレーションの手法

本研究では粒子法の手法のうち SPH 法を用いた。

4.3. 粒子法

数値流体学の手法は格子法と粒子法の二つがある。今後シミュレーションを拡張して破壊や浸食といった大変形を引き起こす津波や洪水といった事象を扱うことを想定している。格子法では格子が壊れてしまい計算が複雑化して計算時間が非常にかかってしまう恐れがある。また、水や地形、建物といった複雑な形状のものは格子法よりも粒子法のほうが表現しやすい。このため本シミュレーションでは粒子法を用いた。

4.4.SP H 法

粒子法には主に MPS 法と SPH 法の二つの手法がある。MPS 法は非圧縮性流体を解くために、SPH 法は圧縮性流体を解くために作られたという成り立ちがある。水は非圧縮性流体であるため水の動きのシミュレータとしては MPS 法を用いるのが一般的である。しかし、SPH 法は外力項に人工粘性を取り入れることによって非圧縮性流体に対応可能である。また、今後火山の噴火により溶岩や火山ガスの動きや、火災が発生した際の炎の動きといったものまでシミュレーションを拡張するために今回のシミュレーションでは SPH 法を用いることにした。

4.5. 地形情報

地形情報には国土地理院が発行する基盤地図情報の数値標高モデル (5m メッシュ)、及び建物の外周線情報を利用した。シミュレーション上には緯度、経度、標高をそれぞれ X,Y,Z 座標に対応させ、その座標に粒子配置することで実際の地形や建造物を表現した。

5. 設計

5.1. 力の計算

粒子の力の計算は次の三つの力によるものとした。

1. 圧力項
粒子間に働く圧力の影響を表す項。
2. 粘性項
粒子間に働く粘性の影響を表す項。
3. 人工粘性項
粒子のすり抜けを防ぐ項。

5.2. 建造物の再現

メッシュ標高の上に多角形の建造物の外周線を載せる際に、Bresenham のアルゴリズムを用いた。Bresenham のアルゴリズムは、与えられた始点と終点の間に連続した点を置き近似的な直線を引くためのアルゴリズムである。2つのセルの中心点と直線の中心点の位置関係に応じて、地形粒子を配置するセルを選択していく。地形粒子を平面上に配置することができたら、地形粒子の上に新たな地形粒子を配置していくことを繰り返していき高さを出していく。Bresenham のアルゴリズムは凸図形にしか対応していないので、現状読み込んだ建造物の外周点情報から凸包を求め、そこから一様な粒子を積み上げることで建物を再現している。今後は粒子を変更し、壁、柱、窓などを再現し津波による崩壊の様子を確かめる。

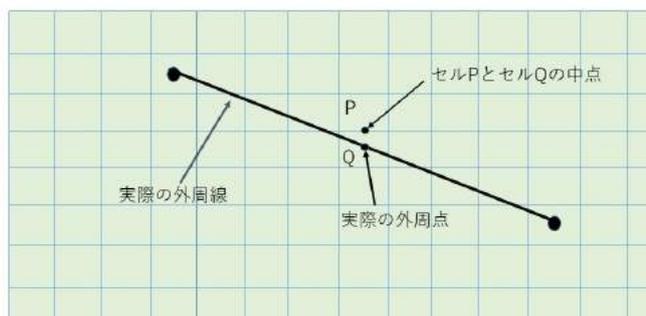


図 1: ブレゼンハムの概要

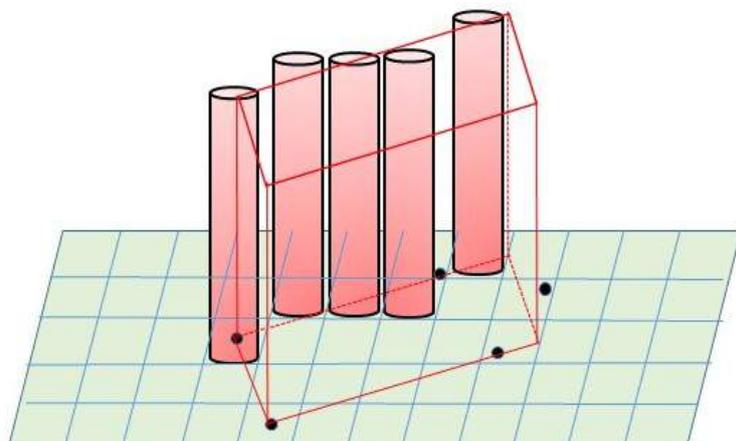


図 2: 建造物を立ち上げるイメージ

5.3. 地形粒子との衝突

地形粒子の影響をペナルティ法を用いて表現した。ペナルティ法は水粒子の力の計算を行う際に地形粒子へのめり込みの程度によって粒子に反発力を与える方法である。

- ペナルティ法による力

ペナルティ法による力の計算にはバネとダンパによるモデルを用いた。バネは地形粒子のめり込みの程度によって反発力を与える。バネと力の関係は以下の式で表される。

$$F = -k * x \quad (21)$$

ここで x はめり込んだ距離, k はバネ定数である。

ダンパは減衰装置であり, 地形粒子にめり込んだ時の速度の程度によって粒子に反発力を与える。ダンパと力の関係は以下の式で表される。

$$F = -D * v \quad (22)$$

ここで D はダンパ定数, v は速度である。このバネとダンパによるモデルを合わせると以下の式のようにあらわすことができる。

$$F = -k * x - D * v \quad (23)$$

壁へのめり込みが起きているかどうかを判定は以下のように行った。

$$r_{over,wall} = h_{wall} - r_{wall} \quad (24)$$

ここで $r_{over,wall}$ はめり込み具合, h_{wall} は地形粒子の影響範囲, r_{wall} は地形粒子と水粒子との距離である。 $r_{over,wall} > 0$ のときめり込みが起きているということになる。よってめり込みによる力は以下の式になる。

$$F = \begin{cases} -k * r_{over,wall} - D * v & (r_{over,wall} > 0) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (25)$$

ペナルティ法を用いると地形粒子との衝突の際の密度, 粘性項, 圧力項の計算は以下のようになる。

$$\rho(x) = \sum_{j \in fluid} m_j W(x - x_j) \quad (26)$$

$$f_i^v = f_{i,fluid}^v \quad (27)$$

$$f_i^p = f_{i,fluid}^p \quad (28)$$

6. 実装

国土地理院が発行する基盤地図情報から作成した地形は図2のようになった。

一様な材質の建物でのシミュレーションのスクリーンショットを図5と図6に示す。

7. まとめ

一様な材質建物での津波災害シミュレーションを行うことはできた。次の課題は、建物の壁や骨組みとなる鉄筋ないし鉄骨部分との材質をかえて、窓や壁が破られる様子を再現することと、地理情報として得られている地形上に、建物モデルを配置するために、建物の外周線情報をもとに建物形状を与えることである。しかしながら、崩壊の様子などを観察するには、さまざまな材質の粒子を配置することが必要である。今後はパラメータを調整しより現実に近いシミュレーションを行う必要がある。



図 3: 鎌倉市の航空写真:Google マップ

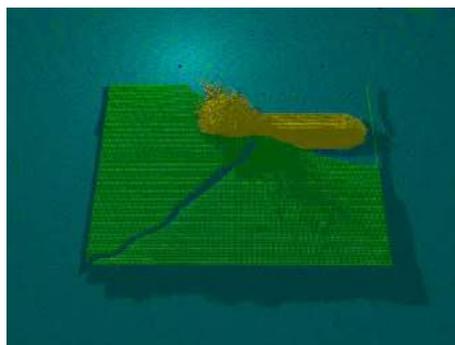


図 4: 標高データから作成した地形に波がぶつかる様子

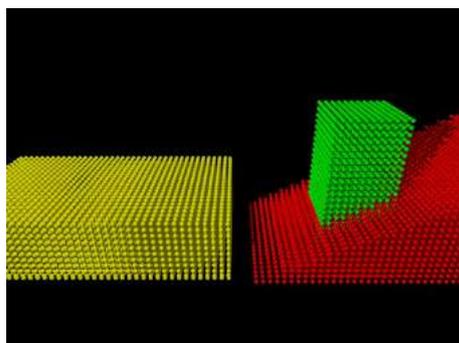


図 5: 一様な材質の建物でのシミュレーション

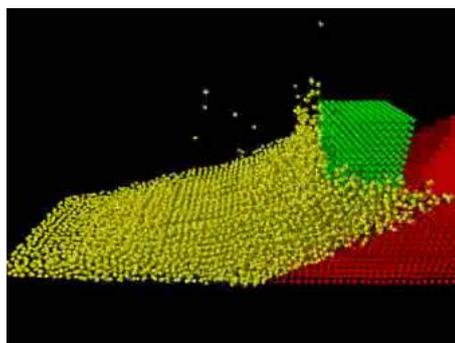


図 6: 水粒子が建物にぶつかる様子

参考文献

- [1] Matthias Muller, David Charypar, and Markus Gross: “Particle-based fluid simulation for interactive applications,” Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pp.154 - 159, Eurographics Association Aire-la-Ville, 2003.
- [2] Mathieu Desbrun and Marie-Paule Gascuel: “Smoothed particles: a new paradigm for animating highly deformable bodies,” In Proceedings of the Eurographics workshop on Computer animation and simulation, 1996.
- [3] 藤田智紀:”防災応用に向けた地理情報システムのための粒子法による津波シミュレーション機能の構築”慶應義塾大学卒業論文,2013
- [4] 小原 俊介, 角田 和彦, 豊谷 純: “GPU による粒子法シミュレーション及び物理ベース CG,” 日本大学生産工学部第 45 回学術講演会講演概要, 2012 年.
- [5] 国土交通省国土地理院:”基盤地図情報サイト-国土地理院’ <http://www.gsi.go.jp/kiban/> 最終閲覧日 2018/11/14