

# 地形の変形に伴う水シミュレーションの変形に関する考察

大場 誉幸<sup>†1</sup> 佐藤 周平<sup>†2</sup> 土橋 宜典<sup>†1</sup>

**概要：**3DCGでの水のシミュレーションは、映画などの映像表現において必須である。しかし、詳細な動きが表現できる高解像度のシミュレーションを行うには長い時間がかかる。また、得られた結果が希望通りでなかった場合でも簡単にやり直すことは難しい。そこで、本稿では、事前に計算した高解像度のシミュレーションデータを低解像度のシミュレーション結果にフィッティングする方法について検討する。大まかな動きは低解像度のシミュレーションによって設計し、高解像度のシミュレーションデータを変形してフィッティングすることで、目的の動きを有する高解像度の映像を生成する。水のシミュレーションは粒子ベースの手法を用い、地形に合わせて変形する方法と粒子分布に関する主成分分析を用いて変形する方法について検討する。

**キーワード：**水のシミュレーション、粒子法、変形

## A Study on Deformation of Simulation Data of Water with Terrain Deformation

**Abstract:** The simulation of water in 3DCG is essential for visual effects in the entertainment applications such as movies and video games. However, it takes a long time to create high-resolution results to express detailed motions of water. Furthermore, due to the expensive computational cost, it is very time-consuming to repeat the simulation to obtain the desired results. In this paper, we discuss a method of fitting the pre-computed high-resolution simulation data to the low-resolution simulation data. The overall behavior of the water flow is designed by the efficient low-resolution simulation. By deforming the high-resolution simulation data to fit the low-resolution simulation data, a high-resolution result with the desired behavior is generated. We use a particle-based method for the simulation of water. We discuss two deformation methods for the particle distribution: deformation along with the deformation of the terrain and deformation using principal component analysis on particle distribution.

**Keywords:** water simulation, particle-based method, deformation

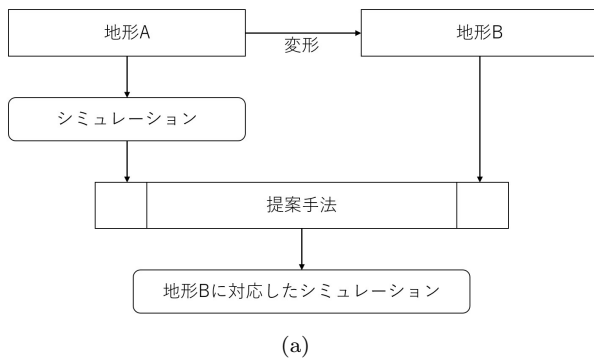
### 1. はじめに

映画などの映像表現において、CGによる水の表現は欠かせない。そのため、シミュレーションによって現実に近い形の水の形状を作成する方法は多く検討されてきた。しかし、複雑で詳細な動きを表現するためには高解像度でのシミュレーションが必要になるが、長い計算時間がかかる。また、望んだ流れが得られない場合や、後から流れの修正を行いたい場合は繰り返しシミュレーションを行って調整する必要があり、非常に手間のかかる作業となってしまう。

本稿では、川の流れを対象として、この問題を解決する手法について検討する。事前に計算した高解像度のシミュレーションデータを変形することで、さまざまな地形を流れる川の映像を効率的に生成する手法を提案する。水のシミュレーションについては、粒子法を用いる。まず、与えられた川の地形に対して大量の粒子を用いて高解像度の水の流れをシミュレーションし、その結果得られる粒子データを保存する。次に、この地形を変形することで新たな地形を生成する。そして、新たに生成した川の地形に対する水の流れを事前に計算した粒子データを変形して生成する。

粒子データの変形に関して、以下の二つの方法について比較検討する。一つ目は、地形の変形に合わせて粒子デー

<sup>†1</sup> 現在、北海道大学  
Presently with Hokkaido University  
<sup>†2</sup> 現在、富山大学  
Presently with University of Toyama



(a)  
図 1 提案手法の流れ

タを変形する方法である (3 節)。もう一つは、変形した地形に対する川の流れを比較的少数の粒子を用いて低解像度でシミュレーションし、その結果に合わせて事前に計算した粒子データを変形する (4 節)。5 節では、これら二つの手法を用いて生成した結果と変形後の地形に対して高解像度シミュレーションを行った場合とを比較する。

## 2. 関連研究

本節では、流体のシミュレーションデータを修正し、望んだ結果に近い形状を生成する既存研究について紹介する。

Pan らの手法 [1] では、あるフレームでの形状をスケッチやガイドとなるメッシュに合わせて変形し、その形状がアニメーション中で成立するように編集内容を伝搬する事で、ユーザーの望むシミュレーションを得ることができる。水の粒子の特性も考慮されており、ユーザーの入力に非常に近く、現実的な形状を得る事が出来るが、局所的な編集にとどまっており、粒子全体の流れを変えることには注目していない。

Bhat らの手法 [2] では、水や煙などの流れを含む映像を編集し、ユーザーの入力したスケッチと一致した流れを再構成することができる。直感的に流体全体の流れの方向を修正する事ができ、様々な流体に適用可能であるが、2次元での編集のみを想定しており、周囲の環境や、粒子としての特性は考慮していない。

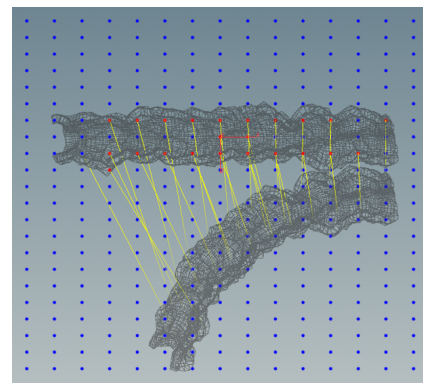
また、Sato らの手法 [3] では、ユーザーの指定に合わせて、非圧縮性を保ちながら流れ場を変形させる事で、入力された流体シミュレーションの挙動を編集する事が出来る。シミュレーションを繰り返す事なく、流体全体の流れを編集する事が出来るが、特に煙に注目した研究であり、地形などの周囲の環境は考慮していない。

## 3. 地形の変形に基づく手法

地形の変形に合わせて事前に計算した粒子データを変形する方法について述べる。地形の生成と水のシミュレーションは、3DCG ソフトウェア Houdini[4] を用いる。粒子

ベースのシミュレーション手法が組み込まれており、地形との相互作用を考慮した水の流れを計算できる。次に、地形に変形処理を施して新たな地形を生成し、それに合わせて粒子分布を変形する。地形の変形に合わせた水の流れの変形方法は以下の通りである。

基本的な考え方は、地形の変形に基づいたベクトル場を生成し、各粒子をこのベクトル場に応じて移動する。変形のためのベクトル場は、変形前後の地形を囲う格子を用いて離散的に表現する。ベクトル場は以下のように生成する。まず、変形前後の地形に対して、指定された個数の対応点を生成する。対応点間の変位ベクトルを計算し、近傍の格子点に割り付ける。



(a)

図 2 地形とベクトル場の例。赤点と黄線は指定した対応点の位置とベクトル場の方向を示し、青点はそれ以外の格子点を示す。灰色のメッシュは変形前と変形後の地形を示す。

そして、変形のためのベクトル場は、以下の離散化したラプラス方程式を解いて、滑らかな場を生成する。

$$\Delta v_i = \frac{\sum_{j \in N_A} v_j - v_i}{6} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $v_i$  は格子点  $i$  のベクトル、 $N_A$  は格子点  $i$  に隣接する格子点の集合を示す。なお、上式はベクトル場の  $x, y, z$  成分それぞれについて解く。ただし、地形の対応点間の変位ベクトルを割り付けた格子点は固定とし、境界条件は自然境界 (ノイマン境界) とする。

## 4. 簡易シミュレーションを用いた手法

新たに生成された地形に対して簡易シミュレーションを実行し、事前に計算した粒子データを変形する手法について述べる。新たに生成した地形に対して、粒子数の少ない低解像度のシミュレーションを実行する。このシミュレーションは低コストのため、短時間で実行することができる。そして、事前に計算した高解像度の粒子データと低解像度の粒子データの分布ができるだけ一致するよう、高解像度の粒子データを変形する。

以降、説明の簡単化のため、事前に計算した高解像度の粒子データを”リファレンス”、新たな地形に対してシミュレーションした低解像度の粒子データを”ターゲット”と呼ぶ。リファレンスとターゲットの間の対応関係を構築し、それぞれの粒子分布が一致するようにリファレンスの粒子分布を変形する。以下、対応関係の構築方法と変形方法について説明する。

#### 4.1 対応関係の構築

リファレンスとターゲット、それぞれについて、粒子の発生源からの直線距離に応じて、粒子をグループ化する。グループ数はリファレンスとターゲットで同じとし、ユーザにより指定する。各グループには、順にグループ番号を割り付け、リファレンスとターゲットの間で、同一の番号のグループに割り付けられた粒子同士の分布が一致するように変形処理を施す。図に、この方法によって対応関係を構築し、グループ化を行った例を示す。

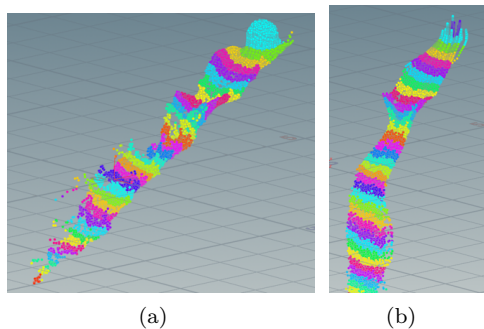


図 3 (a) リファレンスについてグループ化を行った例。各色はそれぞれのグループを示す。(b) 各フレームでの形状を重ね合わせた簡易シミュレーションについてグループ化を行った例。

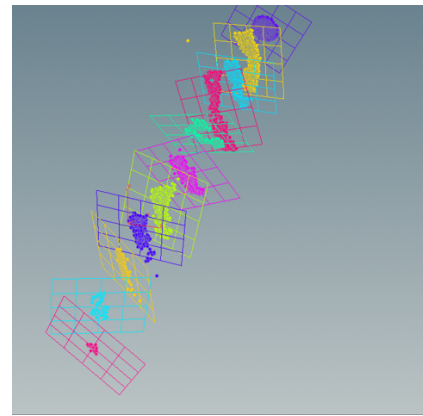
#### 4.2 変形処理

各グループごとに、リファレンスとターゲット間での粒子分布が一致するように変形処理を施す。流れの方向に対して垂直な平面での分布が一致するように変形する。

前節で述べた平均軌道上に生成した各サンプル点位置において、軌道に垂直な仮想的な平面を生成する。そして、仮想平面上に 2 次元の局所座標系を考える。次に、サンプル点にグループ化された粒子をこの仮想平面に投影することで、仮想平面内での 2 次元座標を求める。(図 4)

全ての粒子の 2 次元座標に対して主成分分析を適用し、第一および第二主成分の主軸方向および分散を求める。図 3 に示す各グループに対して、この処理により主成分分析を行った結果を図 5 に示す。

次に、各グループごとにリファレンスとターゲットの対応する粒子グループ間について、重心位置と主成分方向および分散が一致するように変換行列を求める。グループ  $i$  の



(a)

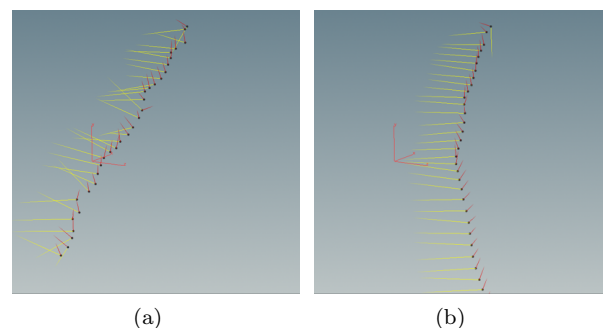
図 4 各グループごとに生成した、軌道に垂直な平面と投影されたグループ内の粒子の例。視認性のため、図中には一部のグループのみ表示する。

変換行列  $M_i$  は次式のように表される。

$$M_i = T_{t,i} S_i R_i T_{r,i} \quad (2)$$

ここで、 $T_{r,i}$  はリファレンスのグループ  $i$  に割り付けられた粒子の重心が原点にくるような平行移動を行う行列、 $R_i$  はリファレンスの主成分方向をターゲットの主成分方向に一致させる回転行列、 $S_i$  はリファレンスのそれぞれの方向への分散がターゲットのものと一致するようにスケールを行う行列、 $T_{t,i}$  は原点をターゲットの重心位置に平行移動する行列である。

上述の変換行列を用いて、リファレンス内の各グループの粒子をターゲットの対応する位置に変換できる。しかし、グループごとに独立に変換処理を行うと、グループ境界で不連続な変換となり、不自然な結果となってしまう。そこで、提案手法では、リファレンスの各粒子について、近傍の二つのグループの変換行列を用いて座標変換する。そして、各グループの重心からの距離を用いてその結果を線形補間することによって滑らかな変換結果を得る。



(a)

(b)

図 5 図内の黒点は各セクションの重心、黄色線は仮想平面内での第一主成分の主軸方向、赤線は第二主成分の主軸方向を示す。それぞれ粒子の進行方向について垂直になっている。(a) リファレンスについて。(b) ターゲットについて。

表 1 処理時間の比較 Houdini 上で 63 フレーム分のキャッシュを生成、保存するのにかかる時間を計測した。

図 7(a)	3 秒
図 7(b)	34 秒
図 7(c)	124 秒

## 5. 結果と考察

3 および 4 で述べた手法を用いた実験結果を示す。これらの手法は Houdini[4] を用いて実装した。また、計算機には Intel Corei7-8565U 1.8GHz(CPU) および 16GB メモリを搭載した PC を使用した。

図 6 に実験に使用したデータを示す。図 6(a) はリファレンスの作成に使用した地形を示している。図 6(b) はこの地形を用いて得られるリファレンスの粒子データから水面を生成して表示した結果を示している。図 6(c) は図 6(a) を変形して得られた新たな地形を示しており、図 6(d) は変形後の地形に対して少ない粒子数でシミュレーションした水の流れを示している。4 節の方法に対するターゲットになる。

図 7 に提案法を用いて図 6(c) に対する流れを生成した結果を示す。図 7(a) は 3 節の方法を用い、地形の変形に合わせてリファレンスの粒子分布を変形した結果である。図 7(b) は図 6(d) の結果をターゲットとして用い、4 節の方法を用いて生成した結果である。また、参考として、図 7(c) は、変形後の地形 (図 6(c)) に対して、多数の粒子を用いてシミュレーションした高解像度の結果を示している。

地形の変形に合わせて変形した図 7(a) は高解像度シミュレーション結果 (図 7(c)) に比べて形状に歪みあり、水の流れとして不自然な形になっている部分が見られる。4 節の手法を用いて得られた形状 (図 7(b)) については、図 7(c) と大まかな形状は一致しており、水として自然な流れになっていることがわかる。しかし、図 7(c) と完全に一致することはなく、特に流れに対する横幅が小さくなっている。原因として、ターゲットの生成に用いた粒子数が少なすぎ、地形の影響を正確に反映できていないことが考えられる。

それぞれの手法での計算時間を表 1 に示す。3 節の手法では、速度場の計算に 6 秒を要するが、この処理は最初に 1 回だけ行えばよい。4 節の手法での計算時間には、ターゲットを生成する時間とそれを用いてリファレンスを変形する時間が含まれる。どちらの手法も再度高解像度のシミュレーションを行う場合よりも速くなっていることがわかる。

## 6. まとめと今後の課題

本稿では、事前に計算した高解像度のシミュレーション結果を変形することで、異なる地形に対する川の流れの映像を効率的に生成する手法について考察した。地形の変形

に合わせて粒子分布を変形する手法 (3 節) と新たな地形で実行した低解像度のシミュレーション結果に合わせて変形する手法 (4 節) について実験を行った。

3 節の手法は高速に動作するものの、変形後の地形の影響が考慮されず、不自然な結果が得られることがわかった。変形用のベクトル場の生成において、より水の特徴を維持した変形が行える手法が必要であると考えられる。また、4 節の手法は、計算時間は増加するものの、この問題を解決することができ、より自然な流れを生成することができる。しかし、まったく異なる地形に対する流れを生成する場合には、問題が生じることが予想される。リファレンスとターゲットの間の最適な対応関係の構築方法が必要となると考えられる。また、どちらの手法も変形後の流れ場は非圧縮条件をみださず、不自然な流れが生成される可能性がある。非圧縮条件を考慮して変形後の粒子位置を補正する手法が必要と考えられる。

## 参考文献

- [1] Z. Pan, J. Huang, Y. Tong et al : "Interactive Localized Liquid Motion Editing" ACM Transactions on Graphics (2013)
- [2] K.S.Bhat, S..Seitz, J.K.Hodgins et al : "Flow-based Video Synthesis and Editing" ACM Transactions on Graphics (2004)
- [3] S. Sato, Y. Dobashi, Y.Yue et al : "Incompressibility-Preserving Deformation for Fluid Flows Using Vector Potentials" The Visual Computer(2015)
- [4] SideFX Houdini Apprentice <https://www.sidefx.com/ja>

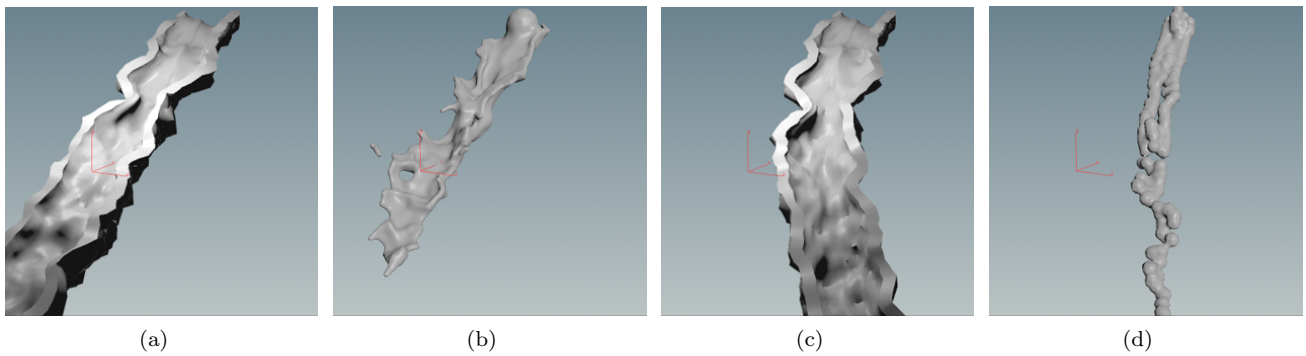


図 6 (a) 参照用のシミュレーションを生成するのに使用した地形 (b) 参照用の高解像度シミュレーション。水しぶきなどの細かい表現が存在する。(c)(a)を変形して得られた新しい地形。(d) 地形(c)を用いて簡易的に生成した低解像度シミュレーション。一つ一つの粒子が大きく、全体の流れを表しているが、詳細な情報を持っていない。

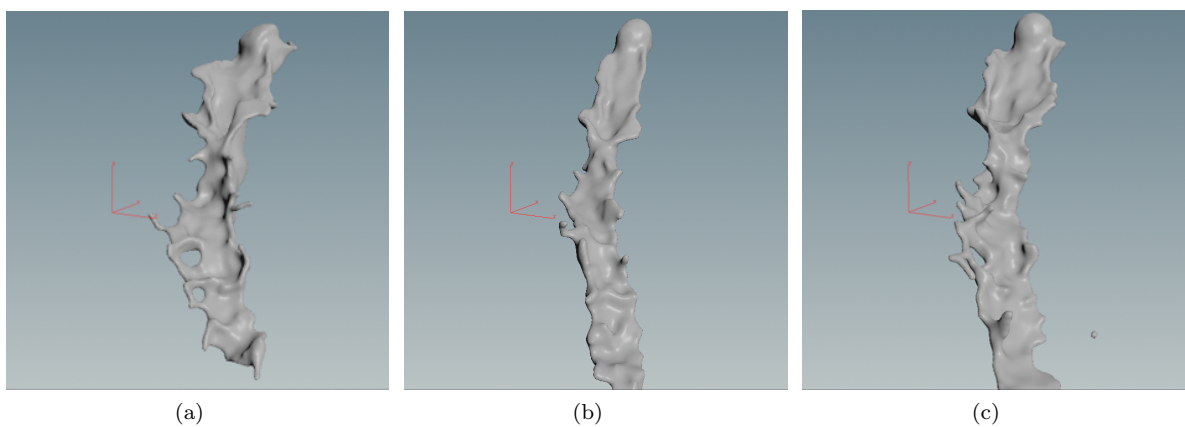


図 7 (a)3 節の手法を用いて生成した形状。(b)4 節の手法を用いて生成した形状 (c) 高解像度で (b) のシミュレーションを行った例。