

1 はじめに

1.1 研究背景

一昨年に東日本大震災がもたらした多大な津波や、都市部を中心に局所的に襲うゲリラ豪雨など、溢水氾濫や内水氾濫が頻繁に引き起こされるケースが多くなっている。時に、氾濫水が道路のアンダーパスに侵入し自動車内から人が脱出できない事態も珍しくない。また、過去には大きな水難事故として1982年7月に長崎豪雨災害があげられる [1]。この災害における自動車の被害はおよそ2万台にもおよび、長崎市内では多くの方が犠牲となっている。現在、実物大の実車模型を用いて、自動車の水害事故の状況を再現する実験が行われ、その検証結果を基に、自動車に関する水難について防災意識向上の必要性が主張されている。

1.2 目的

実車スケールの実験や検証では、その設備上の理由による条件設定の限界や、安全上の理由によるユーザによる実地検証の限界などの制約がある。本研究では、これらの物理的実験に替わり、PCにおける仮想空間でのシミュレーション環境での検証方法の確立を目的とする。このような環境整備により、延いては、ドライバーによる被災疑似体験を可能とし、自助意識の向上につながると考える。

2 関連研究

先行する物理的な検証研究として、京都大学防災研究所での研究が挙げられる [2]。実験装置として、水槽（長さ6.0m、幅1.5m）を用意し、実物大の自動車を設置し浸水状況を再現し体験実験を行い、浸水時のドアを開ける際の力の測定や水没時の自動車からの避難実験を行うことで、自動車水没時の危険性、避難困難度を検討し、実験結果からドライバー自身が危険性を認識し、注意深い行動をとることが重要であると述べている。

一方、流体シミュレーションにおいては、粒子法が注目されている。従来難しいとされる水しぶきや煙が立ち上がる様子など、流体や固体の複雑な動きを扱え、物理ベースCGの表現技術として適していると言われている [3]。

3 提案手法

本研究は、粒子法による流体シミュレーションの枠組みに基づいて、PC上で仮想的に浸水実験環境を構築する方法を提案する。具体的には、SPH法による流体の表現と、同等のスケールの粒子による固体の表現とを混在させることにより相互の干渉をシミュレーションする。固体の物体表現では、一般的なポリゴンメッシュによる形状モデルから、粒子による表面形状への変換を行う。これにより、自動車の設計データや実測の形状計測モデルをシミュレーション対象として採用可能となる。

3.1 粒子法シミュレーション

3.1.1 支配方程式

粒子法ではラグランジュ的記述により、流体運動に伴って連続体としての流体を構成する粒子が時間的にどのように動くかに注目する。流体の運動量保存の式は式(1)で表される。

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f \quad (1)$$

ここで  $\rho$  = 密度,  $v$  = 速度,  $p$  = 圧力,  $\mu$  = 粘性係数,  $f$  = 外力 であり、右辺はそれぞれ圧力項・粘性項・外力項である。左辺の微分  $\frac{D}{Dt}$  はラグランジュ的記述によるものである。水などの液体の流体は非圧縮性なので力を受けると圧縮されないよう圧力が働く。流体の速度を均一にしようとする力が粘性力である。また、外力は普通重力のみである。これらにより流体の速度変化はその流体に働く力の和と等しい。

3.1.2 SPHの原理

式(1)を粒子法で解くにはまず空間における物理量  $\phi(r)$  (圧力, 密度, 速度 etc) を計算する必要がある。SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) では空間のある座標  $x$  での物理量  $\phi(x)$  は物理量  $\phi(r)$  を空間において積分して求める。

$$\phi(x) = \int \phi(r) W(x-r) dr \quad (2)$$

ここで  $W$  はカーネルである。カーネル  $W$  は正規化されており  $\int W(x-r) dr = 1$  という条件を満たすものである。式(2)の積分つまり、座標  $x$  での物理量  $\phi(x)$  は周囲の粒子の持つ物理量  $\phi_j$  の和として求められる。よって座標  $x$  の粒子について計算する時には式(3)は以下のようなになる。

$$\phi(x) = \sum_j m_j \frac{\phi_j}{\rho_j} W(x-x_j) \quad (3)$$

$m_j$  は粒子  $j$  の持つ質量,  $\rho_j$  は粒子  $j$  の持つ密度であり  $m_j = \rho_j \Delta r_j$  が成り立つ。また  $x_j$  は粒子  $j$  の座標である。一般的にカーネル  $W$  は図1に示すように  $x$  からの距離に応じて減衰するものが用いられる。

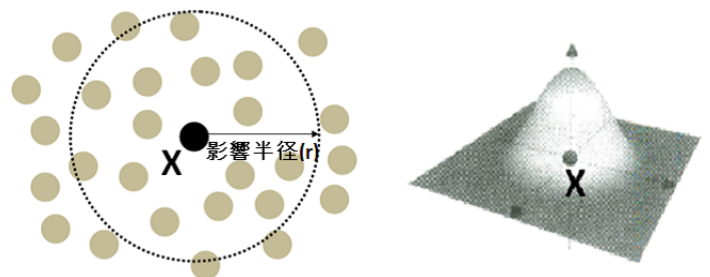


図 1: 近傍粒子とカーネルの影響

流体の運動方程式を解くためには、物理量のほかに物理量の勾配を計算する必要がある。 $x$  での物理量  $\phi(x)$  の

勾配  $\nabla\phi(x)$  は式 (3) の勾配を取り，粒子の持つ物理量の総和で近似すると，以下のように表される．

$$\nabla\phi(x) = \sum_j m_j \frac{\phi_j}{\rho_j} \nabla W(x - x_j) \quad (4)$$

このように SPH で物理量の勾配の計算を行うときには，粒子の持つ物理量ではなくカーネルを微分すれば良い．

### 3.1.3 支配方程式の離散化

流体の支配方程式である式 (1) や式 (3) や式 (4) を用いて離散化する．方法としては圧力項・粘性項・外力項を一度に解くのではなく 1 つずつ式 (4) を用いて力を解き最後にそれらによる力の和をとり加速度を求める．流体の挙動を解くためには圧力項と粘性項を，粒子の保持している物理量を用いて計算を行い，粘性項を解くためにはラプラシアンを計算する必要がある．

### 3.1.4 カーネル

それぞれの項の計算にはカーネルが必要でありまず密度の計算に用いられるカーネルは以下のように定める．

$$W(r) = \begin{cases} \frac{315}{64\pi r_e^9} (r_e^2 - |r|^2)^3 & (0 \leq |r| < r_e) \\ 0 & (r_e \leq |r|) \end{cases} \quad (5)$$

ここで  $r_e$  は影響半径であり，粒子  $i$  からの距離以内に存在する粒子のみ粒子  $i$  に影響を与える．

## 3.2 固体 (自動車) モデルの作成

固体モデルは，流体モデルと同等のサイズの粒子で構成する．同等のサイズの粒子で構成することで，流体粒子との接触判定を含めた物理的計算を行うことができる．

本研究では，メッシュ情報を有する既存の 3D 自動車モデルを基に，頂点情報が面上に密度が均一になるように再サンプリングを行い，粒子で覆えるように手動で頂点密度を調整し，頂点に粒子を配置させ自動車モデルの作成を行った．(図 2 参照)

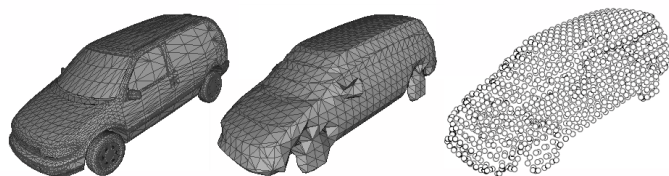


図 2: モデル作成：(左から) 元メッシュ, 再サンプル, 粒子

## 4 実験

### 4.1 実装内容

実行開発環境として Microsoft Visual Studio 2008 を使用し，シミュレーション結果をレンダリングするためにフリーソフトの Pov-Ray を利用する．レンダリングして得られる画像データに ffmpeg を利用し動画化を行う．プログラムでは，3.1 章の内容を基に，各粒子について計算された力を用いて速度を更新し，時間積分を行い次の座標を計算する．微小タイムステップ (0.04 秒) で計算を行い，この計算を全ての流体粒子についてループさせて繰り返す．1 タイムステップにおける力の算出は，粒子一つ一つが持っている加速度を基に計測を行う．また，固体モデルは位置を固定した状態でシミュレーションを行う．

## 4.2 結果

流体粒子数 1 万 800 個を固定物体 (自動車モデル) を用い，100 フレームのシミュレーションを行った．その時のレンダリングの結果の例が図 2 である．また，その時に車の後面に作用した力の履歴は図 3 のような結果となった．

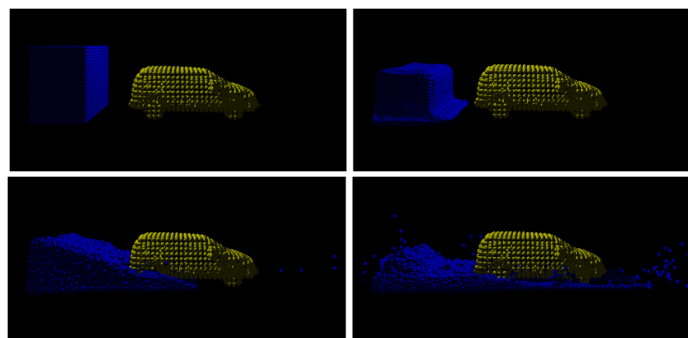


図 3: レンダリング結果

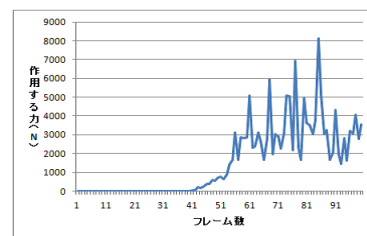


図 4: 作用する力の結果

粒子による液体と固体の表現により，車体への浸水を模したシミュレーションを可視化することができた．このことは，災害時のイメージ生成に役立つと考えられる．シミュレーションの挙動および物理量については，実環境の状況を粒子として離散化させる際のスケールや，パラメータの妥当性の検討が必要である．実際の物理的実験などとの比較検証を今後の課題とする．

## 5 おわりに

本研究では，粒子法シミュレーションに基づいて，浸水時の自動車を仮想的に再現する手法を提案した．今回，自動車の粒子モデルは，架空のモデルデータを基に作成したが，実在する自動車を 3D スキャナを用いて計測すればそのデータを基にモデルの作成が可能である．

今後，物理パラメータの設計指針の確立により，PC 一つでさまざまな条件の実験をでき，有効な手段となることが期待される．しかし，数千数万の粒子の計算を行うと，処理速度に問題が生じている．今後はリアルタイムで処理を行うためにも，GPU (Graphics Processing Unit) を活用した高速処理が，課題としてあげられる．

### 参考文献

- [1] 高橋和雄・高橋裕，クルマ社会と水害 長崎豪雨災害は訴える，九州大学出版会，1987.
- [2] 馬場・石垣・戸田，水没した自動車からの避難の難しさ，京都大学研究所年報 第 53 号，pp.553-559.
- [3] 越塚誠一，粒子法シミュレーション 物理ベース CG 入門，培風館，2008.