

付着力を考慮した雨による汚れのビジュアル シミュレーション

田中将貴[†] 床井浩平^{††}

CG によるリアルな映像表現に必要な不可欠な経年変化の一つである雨による汚れは、粒子法の一手法である SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いることで再現できる。しかし、先行研究では、水の付着力の影響を重視したものはない。本研究では SPH 法を拡張し、付着力による影響を考慮した雨による汚れの生成手法を開発した。本手法は水滴が物体表面を伝う現象や、水滴が滴る現象により生成される汚れを再現可能である。

Visual Simulation of Dirt by Rain with Adhesive Force

MASAKI TANAKA[†] KOUHEI TOKOI^{††}

The dirt by rain is one of the indispensable expressions of aging in photo-realistic rendering of Computer Graphics. This can be reproduced by using the SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) method that is one of the particle methods. However, the influence of the adhesion power of rainwater is not considered in the previous works. In this research, we have developed a reproduction technique of dirt by rain by means of enhancing the SPH method, and considered the influence by the adhesion power of rainwater. Our method can reproduce dirt generated by the phenomenon such the drop of water is going along on the object surface and the dripping water.

1. はじめに * [*の文字書式「隠し文字」]

1.1 背景

ある環境下にある物体は、その環境の影響を受けて経年変化する。これは、浸食や、錆、汚れの付着などが起因する。コンピュータグラフィックスを用いてリアルな映像を作るためには、これらの経年変化をリアルに再現する必要がある。経年変化の中でも雨による汚れによって出来る模様は、物体形状に大きく依存し、複雑な形となる。雨による汚れをリアルに再現するには、物体に手作業で汚れを書き込む手法が一般的に用いられる。この作業には、多くのコストと時間が必要である。そのため、雨による汚れを自動的に生成する研究がされている。

1.2 関連研究

Julie らは、水と物質表面の科学的相互作用を表した微分方程式と SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を合成した手法を提案している 2)。Julie らは、提案手法を用いることで、自然で複雑な汚れの生成が可能であると示した。

Chen らは、大域照明の手法を応用した、 γ -ton tracing という経年劣化を表現する手法を提案している 3)。この手法は経年変化の原因となる場所から、汚れの原因となる粒子を放出し、その挙動を追跡する。その結果を格納した γ -ton map を汚れの量や劣化具合を変化させるパラメータとして利用している。これらは、雨による汚れの生成に関する研究である。それぞれ十分自然に見える汚れの生成がなされている。しかし、物体表面を伝う現象や、水滴が滴る現象による汚れの表現が十分ではない。

内田らは SPH 法に表面張力と界面張力を加えることで、氷から溶け出した水が氷から滴る現象や、氷表面を水が伝う現象が表現できることを示した 4)。これは、水の挙動の表現に関する研究であり、SPH 法だけでは困難だった水の挙動の表現が可能と示した。

1.3 研究目的

本研究では水滴の付着力に着目した雨による汚れの生成を目的とする。この付着力を決める要因として、界面張力係数を用いる。この係数により、雨による汚れを、水滴の付着力の違いによって描画仕分けることができる。また水滴の付着力による影響を、壁重み関数化することで計算量を減らすことができる。これらの観点から、雨による汚れの生成を行った。

[†] 和歌山大学院大学
Graduate School of Engineering, Wakayama University
^{††} 和歌山大学
Wakayama University

1.4 論文の構成

本論文では付着力を考慮した雨とそれにより生成される汚れについて報告する。

本論文の以降の構成を以下に示す。

第2章では、本論文での界面張力やその影響について述べる。

第3章では、提案手法について記述する。前半で雨のモデル化、汚れのモデル化について説明する。また、後半に高速化手法をまとめて解説する。

第4章では、実験とその結果について記述する。

第5章でまとめと本研究の問題点や今後の課題について述べる。

2. 雨による汚れと付着力

2.1 雨による汚れの特徴

雨による汚れの模様は、非常に複雑である。また、その汚れの模様は物体形状によって発生する水の流れに依存する。また、雨による汚れを観察すると、雨の持つ物体への付着力が汚れの発生に大きな影響を与えていることが分かる。本研究では、このような付着力が大きく関わる汚れの生成を目的とする。また、汚れへ雨の作用には、洗浄と堆積がある。洗浄とは、物体表面に付着した汚れを雨が吸着し、洗い流す作用とする。堆積は、雨が蒸発などする際に、洗浄などにより内包する汚れをその場に付着させる作用とする。また、雨による汚れは、水溶性の汚れと非水溶性の汚れの2種類に分けられる。水溶性の汚れとは、物体表面下に汚れが吸着されることにより発生する。また、非水溶性の汚れは、水が滞留する部分に堆積し、流水部分では洗浄される。以下に、雨による汚れの例を示す(図1)。



図1 雨による汚れの例

2.2 水の付着力

水が物体表面を伝う現象や、滴下現象は、水の付着力が起因する。

物体への水の付着力は、物体との境界面に対する水の粘り気とする。付着力が水の分子間力等が作用して発生すると考えると、付着力の大きさは物体との境界面の大きさに依存する。水と物体の境界面の大きさは、水と物体の界面張力の関係や、分子間力、物質表面の微細形状などが関係している。

提案手法では、付着力を決定する様々な作用を考慮した係数を用いて、付着力を表現する。この係数を界面張力係数とする。

3. 提案手法

本章では、SPH法を用いた雨による汚れのビジュアルシミュレーションの手法について述べる。

提案手法は粒子を乱数により生成し、不規則かつ均一に降り注ぐ雨を再現する。そしてSPH法に界面張力を考慮した物体への付着力を組み合わせて、物体表面での雨の挙動を再現する。この付着力は、界面張力係数によって力の大きさを制御する。これにより再現された雨とモデルの衝突判定の際に、モデルへ汚れを付着させることで雨による汚れを生成する。また、格子を用いた近傍粒子探索と壁重み関数によって壁境界条件を事前計算により高速化を行った。

現実世界では、雨には外力として様々な力が働く。例えば、空気の流れや、空気抵抗などがある。これらの外力は、雨による汚れに影響を与える。しかし、本研究では、これらの影響を考えないものとする。また、温度を一定とし、温度変化による付着力の変化を考慮しない。

3.1 雨のモデル化

ここでは、雨の挙動に関する記述をする。まず、SPH法について解説する。その後、界面張力係数と付着力について述べる。

3.1.1 SPH法

本研究では、流体の挙動を表現する手法として、粒子法の一手法であるSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法を用いる。SPH法は、ポワソン方程式を解かない。そのため、他の粒子法の手法と比べアルゴリズムが比較的単純であり、リアルタイムシミュレーションなど処理速度が重要である場合に向いている。

粒子*i*の速度 v_i は、以下のナビエ・ストークス方程式(1)により求められる。

$$\rho_i \frac{Dv_i}{Dt} = -\nabla p_i + \mu \nabla^2 v_i + f \quad (1)$$

(ρ : 密度 D/Dt : ラグランジュ微分 流れの上での物理量の変化を示す v : 速度
 p : 圧力 μ : 粘性係数 f : 外力)

右辺はそれぞれ、圧力項、粘性項、外力項である。圧力とは、非圧縮である流体が、力を受けたときに圧縮されないように働く力である。粘性力は流体の速度を均一にするように働く力である。そして、外力は重力等、力の影響範囲内にある粒子すべてに均一に働く力である。SPH法で流体シミュレーションを行う際には、各タイムステップで、粒子一つ一つに対して上記の式を解き、粒子の速度 v_i から、粒子位置を求めることにより流体をシミュレートする。

SPH法の定式化では、Müllerらの手法を用いる7)。以下に本研究で用いるSPH法の式とカーネルをまとめる。

(1) 密度

粒子の密度 ρ_i は以下の式(2)、(3)により求められる。

$$\rho_i(x) = \sum_j m_j W(x_i - x_j) \quad (2)$$

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

(m : 質量 W : カーネル r_e : 影響半径 p : 圧力 μ : 粘性係数 f : 外力)
また、密度から以下の項で用いられる粒子地点での圧力を式(4)により求める。ここで、 ρ_0 は定常密度である。

$$p = k(\rho - \rho_0) \quad (4)$$

(2) 圧力項

圧力項は、以下の式(5)、(6)により求められる。

$$f_i^{press} = -\nabla p_i = -\sum_j m_j \frac{p_j}{\rho_j} \nabla W_{press}(x_i - x_j) \quad (5)$$

$$\nabla W_{press}(r) = \begin{cases} -\frac{45}{\pi r_e^6} (r_e - |r|)^2 \frac{r}{|r|} & (0 \leq |r| < r_e) \\ 0 & (r_e \leq |r|) \end{cases} \quad (6)$$

(3) 粘性項

粘性項は、粒子の速度の差から以下の式(7)、(8)で求められる。

$$f_i^{vis} = \mu \nabla^2 v_i = -\mu \sum_j m_j \frac{v_j - v_i}{\rho_j} \nabla W_{vis}(x_i - x_j) \quad (7)$$

$$\nabla W_{vis}(r) = \begin{cases} \frac{45}{\pi r_e^6} (r_e - |r|) & (0 \leq |r| < r_e) \\ 0 & (r_e \leq |r|) \end{cases} \quad (8)$$

(4) 外力

重力のみが外力として働くとすると、式(9)となる。

$$f_i^g = g \quad (9)$$

3.1.2 付着力の定式化

ここでは、本研究で用いる界面張力係数と付着力について述べる。提案手法では、付着力により物体へ水滴が付着する現象を再現する。付着力とは、物体との境界面に対する水の粘りの度合である。そして、付着力をコントロールする界面張力係数 k_w は、物体の親水性、つまり、界面張力の関係や、物体表面の微細形状などを表す。この係数によって、物性や、表面の微細形状の違いによる水の付着力を表現する。

本研究では、汚す対象となる物体は静止しているため、雨が物体へ付着する力のみを考える。物体を物体粒子の集合として考えると、雨の付着力は、影響半径内の物体粒子の引力の和と考えられる(図2)。

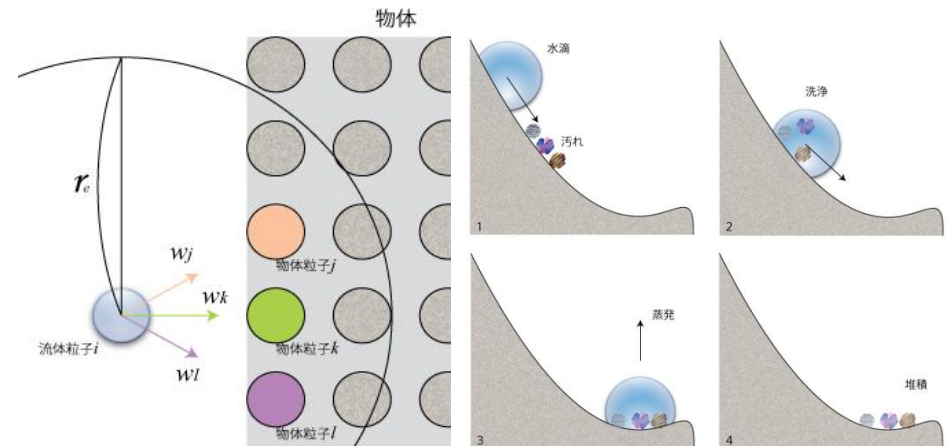


図2 付着力と粒子

図3 非水溶性の汚れのモデル

図2の w_j , w_k , w_l はそれぞれ、流体粒子 i に働く物体粒子 j , k , l の引力を表す。

物体粒子の引力を正規化し和をとると、雨の粒子の付着力 f_w は以下の式(10)で表すことができる。ここで、 k_w は界面張力係数、 x_j は壁粒子の位置ベクトル、 x_i は雨の粒子の位置ベクトルである。本研究では、物体境界の計算において物体粒子を用いない。よって、この式を壁境界の計算に用いる壁重み関数により、この式(10)を置き換えると式(12)となる。この式(12)の導出については、後述する壁重み関数による境界条件の事前計算で述べる。

$$f_w = k_w \sum_j \frac{x_j - x_i}{|x_j - x_i|} \quad (10)$$

$\sum_j \frac{x_j - x_i}{|x_j - x_i|}$ は、水の粒子から壁粒子への単位ベクトルの総和である。

3.2 汚れ

ここでは、汚れの付着や、汚れへの雨の作用について述べる。本研究では、非水溶性の汚れと、水溶性の汚れの二つの観点から汚れをモデル化する。

非水溶性の汚れの生成手順は次のようになる。まず、対象物を構成する面の法線の向きにより、変化を付けた非水溶性の汚れを付着させる。付着した汚れを雨の粒子により洗い流す。洗い流された汚れは、運搬され、別の場所に堆積する図3。

水溶性の汚れの生成手順は次のようになる。水溶性の汚れは初めから水に含まれているものとする。水と対象物が接している部分に、水溶性の汚れを付着させる。また、水溶性の汚れは、付着すると他へ移動したりしない。

3.3 高速化手法

提案手法に取り入れた高速化手法について述べる。提案手法では、格子を用いた近傍粒子探索法1)と、壁重み関数によって壁境界条件を事前計算する手法を取り入れた。壁重み関数による壁境界条件の事前計算では、原田らの開発した手法5)について述べ、次に、独自の手法として付着力を壁重み関数としてモデル化する。

3.3.1 格子を用いた近傍粒子探索

SPH では粒子間相互作用を計算するために、近傍粒子を探索する。全粒子から総当たりで探索を行なうと、粒子数が増加していくにつれて計算コストが非常に高くなってしまふ。そこで提案手法では3次元格子を導入して近傍粒子探索を高速化した。

3.3.2 壁重み関数による壁境界条件の事前計算

壁重み関数による壁境界条件の事前計算について述べる。原田らの開発した手法5)について述べる。その後、付着力の壁重み関数について述べる。

壁を不動の粒子集合とする従来手法は、総粒子数の増加や、壁境界が正確に計算できないという問題点がある。そこで、原田らの開発した手法を用いる。壁が流体粒子

に与える影響を、壁までの距離に依存すると仮定し、流体粒子が受ける壁粒子の密度、粘性項、圧力項の影響を壁までの距離により求める手法である。また、衝突判定の対象となる物体を不動の粒子の集合としたとき、この不動の粒子を壁粒子という。

前提条件として、汚す対象となるモデルは不動であり、雨の影響により変形しないとする。つまり、モデルが粒子に与える影響が時間によって変化しない。

原田らの手法は、流体の密度の式を流体粒子の寄与と壁粒子の寄与に分解する。流体粒子は壁の寄与を考えない場合と同じように求める。壁粒子の質量を一定とし、壁粒子が粒子から壁境界に下ろした垂線に垂直に均一に並んでいるとする。すると、壁粒子の密度は粒子と壁境界の距離に依存する。つまり、粒子と壁境界との距離が決まると壁境界の密度への影響が一意に決まる。よって、壁粒子の密度の寄与は、粒子から壁境界までの距離の関数 $|r_{iw}|$ となる式(11)。これを、密度の壁重み関数 $Z_{wall}^{\rho}(|r_{iw}|)$ という。

$$Z_{wall}^{\rho}(|r_{iw}|) = \sum_{j \in wall} m_j W(x - x_j) \quad (11)$$

同様に、圧力項と粘性項を壁重み関数化することで、壁境界条件を事前計算することが出来る。

提案手法である付着力を壁重み関数化する。密度と同様に、壁粒子が雨の粒子から壁境界に下ろした垂線に垂直に均一に並んでいるとする。壁境界までの距離が決まると壁粒子の配置も一意に決まる。水の粒子から壁粒子への単位ベクトルの総和は壁粒子の配置に依存するため、粒子から壁境界までの距離が決まると、雨の粒子に働く付着力も一意に決まる。密度と同様に、付着力は粒子から壁までの距離 $|r_{iw}|$ の関数である式(12)となる。

$$f_w = k_w Z_{wall}^w(|r_{iw}|) \quad (12)$$

4. 実験と評価

本章では、界面張力係数による付着力を実装した際の、雨による汚れの差異を示す。提案手法を実装し、実験を行った環境を以下に示す(表1)。

表1 実装環境

OS	Microsoft Windows 7
CPU	ADM Phenom(tm) II X2 550 Processor 3.10 GHz
RAM	4.00 GB
GPU	NVIDIA GeForce 9600 GT
API	OpenGL, GLSL

4.1 付着力の結果への影響

この実験では、界面張力係数を変化させた際の、結果画像の違いを示す。

計算領域の空間分割数を $64 \times 64 \times 64$ とする。界面張力係数が 100 の場合と、10000 での結果を比較する。その他の変数やシミュレーション時間は同条件である。以下にシミュレーション結果を示す (図4, 図5)。

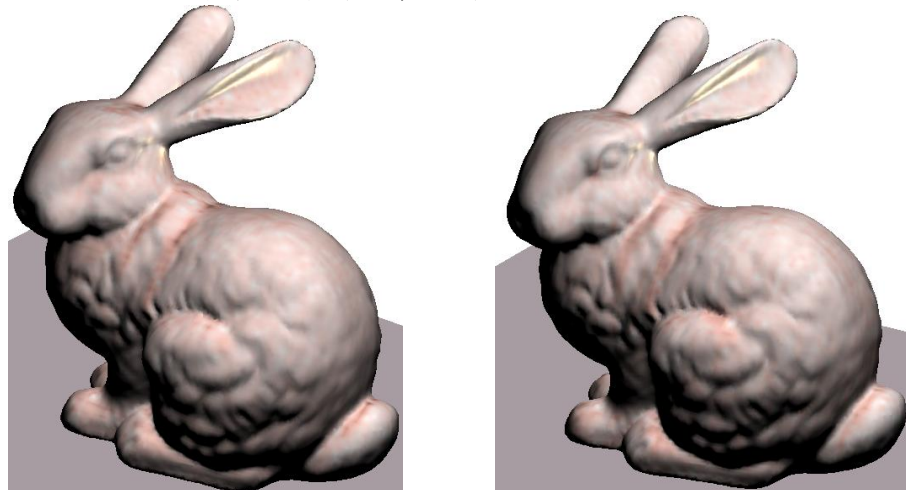


図4 シミュレーション結果 (右: 界面張力係数 100, 左: 界面張力係数 10000)

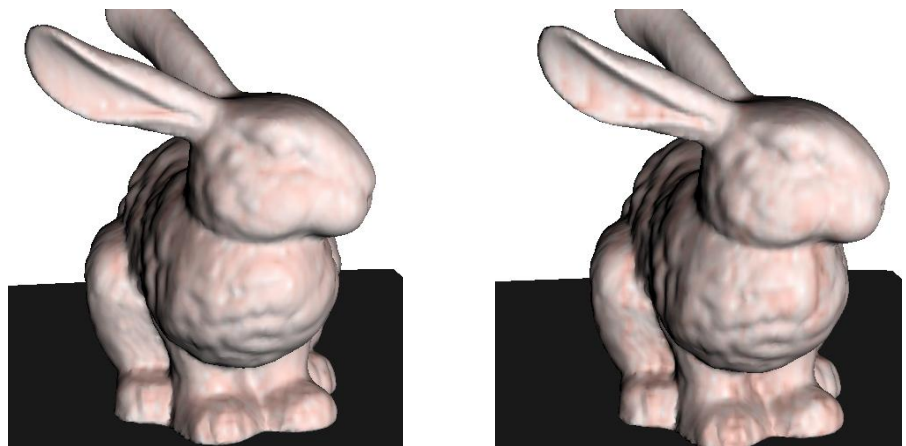


図5 シミュレーション結果 (右: 界面張力係数 100, 左: 界面張力係数 10000)

図4での視点においては、付着力の有無による差が十分に確認できなかった。

図5の視点からは付着力の強弱による差が確認できる。図5の界面張力係数が多き場合は、ウサギ胸部の筋の様な汚れや、ウサギの足下における汚れの模様は、付着力が作用して出来たと分かる。

よって、提案手法により付着力が異なる場合の汚れを生成することが出来ることがわかった。しかし、シミュレーション結果の評価を行っていないため、どの程度写実性があるのか確認することが出来なかった。

5. 終わりに

本研究では、SPH法に付着力を加えることで水の付着力を再現し、雨による汚れを生成する手法を提案した。また、付着力のパラメータとして界面張力係数を用いることで、付着力の異なる汚れが生成可能であると示した。提案手法では、雨の付着力を壁重み関数として定式化し、原田らの壁重み関数による壁境界条件の事前計算法を適応した。これによって、従来手法よりも総粒子数と斜面上での流体の流れにおいて、アドバンテージを得ることが出来た。

以下に問題点と今後の課題を述べる。

- ・実験結果より、付着力の負無による汚れの差異は確認できた。しかし、シミュレーション結果がどのくらい写実性なのか確認することが出来なかった。よって、実際の汚れとシミュレーション結果を比較する必要がある。

- ・シミュレーションのスケールが大きい場合、物体内部に粒子がめり込んでしまう問題点がある。シミュレーションのスケールが小さい場合には、これは起きないが、そうすると処理時間が増加する。よって、大きなスケールに対応した手法を開発するか全体の処理の高速化を行う必要があるとわかる。

- ・3Dテクスチャによって汚れを表現しているため、法線が下向きの面では、雨による汚れの影響が出にくいという問題点がある。

- ・壁重み関数によりどのくらいアドバンテージが得られたかが分からないため、メモリ効率等の点から検証する必要がある。

- ・近傍粒子探索の処理をCPUで行っているが、高速化のためGPUで近傍粒子探索を行う。

参考文献

- 1) 越塚 誠一, “粒子法シミュレーション 物理ベースCG入門”, pp. 39-54, 培風館, 2008
- 2) Julie Dorsey, “Flow and Change in Appearance”, SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, pp. 411-419, 1996
- 3) Yanyun Chen, “Visual Simulation of Weathering By γ -ton Tracing”, ACM Transactions on

Graphics, Vol.24, No.3, pp. 1127-1133, 2005

4) 内田 英行, “融解後の水を考慮した粒子ベース氷塊融解シミュレーション”, Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2010, No. 5, 2010

5) T. Harada, “Smoothed particle hydrodynamics in complex shapes”, Proceedings of Spring Conference on Computer Graphics, pp. 235-251, 2007

6) J.J. Monaghan., “Smoothed particle hydrodynamics”, Annu Rev Astrophys, 543-574, 1992

7) M. Muller, “Particle-based fluid simulation for interactive applications”, Proc. of Siggraph Symposium on Computer Animation, pp. 154-159, 2003