

撥水フロントガラス上での 水滴のリアルタイムアニメーション

仲田 将之^{1,a)} 柿本 正憲^{2,b)} 西田 友是^{1,c)}

概要: ウィンドシールド上の水滴の CG アニメーション手法は、レースゲームや自動車のシミュレータでの特殊効果としてすでに使用されている。これまでのアニメーション手法は、親水表面であるガラスを考慮して水滴が流れに沿って濡れ広がることを想定したものだった。一方、自動車分野ではワイパーに加えて撥水フロントガラスを使用してドライバーの視認性を改善する方法が普及してきた。撥水ガラスに付着した水滴の振る舞いは、普通の親水ガラスでのそれとは異なる。本論文では、フロントガラスの撥水性を考慮した水滴のリアルタイムアニメーション手法を提案する。提案法では各水滴を質点として記述し、動的撥水性や重力、空気抵抗などの外力を考慮してシミュレーションを行う。ガラス表面にはそれと同時に霧雨と同程度の粒径を持つ水滴が多数付着しており、しかもこのサイズの水滴は外力の影響を受けにくく静止しているため、一枚の画像として扱う。水滴の移動によって撥水表面が綺麗になる現象（ロータス効果）も可視化する。本論文では、提案法に基づいて走行する自動車のフロントガラスに付着した水滴のアニメーションが可能なことを示す。

キーワード: 水滴, 撥水, フロントガラス, ドライブシミュレータ, 接触角ヒステリシス

Real-Time Animation of Droplets on A Hydrophobic Windshield

NAKATA NOBUYUKI^{1,a)} KAKIMOTO MASANORI^{2,b)} NISHITA TOMOYUKI^{1,c)}

Abstract: Animation of water drops on a windshield is used as a special effect in advanced driving games and simulators. Existing water droplet animation methods trace the trajectories of the droplets on the glass taking into account the hydrophilic or water-attracting nature of the glass material. Meanwhile, in the automobile industry, usage of hydrophobic glass windshields has recently been a common solution for the drivers' clear vision in addition to cleaning the water with wipers. Water drops on a hydrophobic windshield behave differently from those on a hydrophilic one. This paper proposes a real-time animation method for water droplets on a windshield taking account of hydrophobicity. Our method assumes each relatively large droplet as a mass point and simulates its movement using contact angle hysteresis accounting for dynamic hydrophobicity as well as other external forces such as gravity and air resistance. All of a huge number of still, tiny droplets are treated together in a normal map applied to the windshield. We also visualize the Lotus effect, a cleaning action by the moving droplets. Based on the proposed simulation scheme, this paper demonstrates the motion of the virtual water droplets on the windshield of a running vehicle model.

Keywords: Water droplet, hydrophobicity, windshield, driving simulator, contact angle hysteresis

¹ 東京大学
The University of Tokyo

² 東京工科大学
Tokyo University of Technology

a) nobnak@nis-lab.is.s.u-tokyo.ac.jp

b) kakimotoms@stf.teu.ac.jp

1. はじめに

ウィンドシールド上の水滴の CG アニメーション手法

c) nis@is.s.u-tokyo.ac.jp

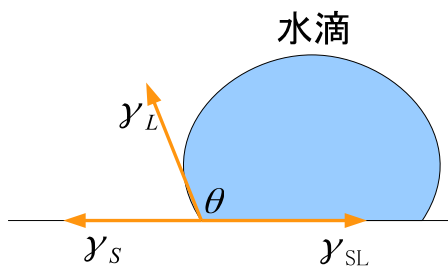


図 1 ヤングの関係式と接触角 θ

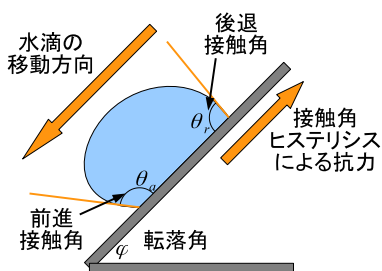


図 2 前進接触角と後退接触角

は、レースゲームや自動車のシミュレータでの特殊効果としてすでに使用されている。本来のガラスは親水性であり、これまでのアニメーション手法でも親水性のガラス表面に水滴が濡れ広がることを想定していた。親水性のガラスには、雨天時に水膜が発生して安全性や快適性が低下したり、着雪/着氷するなどの問題がある。それに対して、撥水機能が付与されたウィンドシールドが実用化されている。そこで、撥水表面での水滴の性質を考慮した、撥水ウィンドシールド上での水滴のアニメーション手法を提案する。

2. 関連研究

撥水性は静的なもの動のもの2種類に分けられる。静的撥水性には接触角(図1参照)がある。動的撥水性には、接触角ヒステリシス(図2参照)、転落速度、転落加速度がある。動的撥水性の物理的原因については未解明な点が多い。

親水性を持つガラス表面では、表面の濡れやすさによって、水は流れつつ濡れ広がる現象が見られる。フロントガラスに付着した水滴のアニメーション手法として、金田ら [4], [5], [6] はガラス表面をグリッド状に離散化し、グリッドの各セルを水滴として記述し、各セルに「濡れやすさ」というパラメータをもたせ、濡れやすさで重み付けされたランダムウォークによって水滴を運動させることで、水滴が濡れ広がる現象を表現した。この手法は、水の付着力の物理的原因を考慮せずに摩擦力の概念を応用している点や、各セルにアーティスティックな手法で「濡れやすさ」というパラメータを与える必要がある点、空気抵抗において物体形状を考慮していない点、ランダムウォークの恣意的なパラメータが必要、などといった問題がある。

Wang ら [8] は流体力学を水滴に応用し、バーチャルサー

フェイス法によって水滴の表面張力だけでなく固体表面の動的撥水性まで考慮することで、微小スケールの流体の現象を表現した。この手法は大量のメモリと計算コストが必要で、リアルタイム性に問題がある。ゲームやドライビングシミュレータへの応用を考えると、リアルタイムでの処理が必要である。また、この手法では空気抵抗は考慮されていない。

CG 以外の分野でも撥水表面での水滴の挙動解析は重要である。例えば燃料電池においても触媒表面を撥水加工することで、触媒から排出される水滴の除去を行うなど、実用上重要である。Ding ら [2] は気体が撥水表面を流れる中での水滴の初動を解析した。一滴の水滴をシミュレートしたもののだが、計算資源の限界から、現実の実験結果の再現には至っていない。

3. 撥水フロントガラスに特化した水滴モデル

提案法では、静的撥水性を考慮して水滴の形状を決定し、質点として記述した水滴の動的撥水性を考慮したアニメーションを行う。さらに、商用のゲームエンジンに提案法を実装し、リアルタイム用途に応用可能であることを示す。

使用する水滴は、雨滴の粒径分布に従って生成する。撥水表面を水滴が移動する場合、進路にある水滴を除去する(ロータス効果(図5))。霧雨程度の粒径の微小水滴を前計算で生成し、水滴の移動にともなう微小水滴分布の動的な変化を微小水滴の描画に反映することで、ロータス効果の視覚化を行う。

3.1 水滴の形状

水滴が水平な固体表面に付着している時、固体表面と水滴表面の作る角度を接触角という。水滴の形状は静的撥水性である接触角を考慮して決定する。接触角は固体と水の表面張力によって決まり、これをヤングの関係式という：

$$\gamma \cos \theta = \gamma_S - \gamma_{SL} \quad (1)$$

ここで、 θ は水滴表面と固体表面のなす角(接触角)、 γ_L は水の表面張力、 γ_S は固体の表面張力、 γ_{SL} は水と固体の表面張力である。

撥水表面に付着した水滴の半径が毛管長(約 2.8mm)より小さい場合、表面張力が水滴の形状に支配的になり、球形に近くなる。実用化されている撥水ガラスの接触角は90度から理論的にも最大120度なので、水滴の形状を半球でモデル化する。

3.2 接触角ヒステリシス

水滴が固体表面に付着している時、水と空気と固体表面の3相が接して作る線を3重線という。3重線の単位長さ当たりに働く水の表面張力を毛管力という。毛管力は、毛細管現象やアメンボの浮力を発生させる。水滴が水平な表

面に静止している時には毛管力は打ち消しあうが、水滴の運動時には、接触角が運動の前進方向と後退方向で異なる現象が起こり、これを接触角ヒステリシスという(図2)。固体表面の化学的不均一や表面の粗さが接触角ヒステリシスの原因と推測されている。

水滴の3重線を円形に固定した時、接触角ヒステリシスによる付着力 F_{hys} は、

$$F_{hys} = \frac{1}{2} \pi \gamma L (\cos \theta_r - \cos \theta_a) \quad (2)$$

となる[1]。ここで、 θ_a は前進接触角、 θ_r は後退接触角である。

3.3 空気抵抗

自動車の走行速度に比例してウィンドシールド上には風が発生し、水滴には空気抵抗がかかる。空気抵抗は

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D S V^2 \quad (3)$$

で計算する。ここで、 ρ は空気の密度、 C_D は水滴の抗力係数、 S は水滴の投影面積、 V は相対速度である。水滴の抗力係数を球の抗力係数で近似する。

固体表面の近くを流れる風は、粘性によって速度が低下する。また、大きな水滴ほど風による変形が大きく、変形により抗力係数が上昇すると考えられる。つまり、大きな水滴ほど風による空気抵抗を受けやすい。そこで、空気抵抗の計算時に風速 V を V' :

$$V' = \begin{cases} V \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{2}} & (0 \leq y < \delta) \\ V & (y \geq \delta) \end{cases} \quad (4)$$

と置き換える。ここで、 y は水滴の高さ、 δ は境界層の高さである。これによって、小さな水滴の空気抵抗を低減する。

3.4 回転抵抗

撥水表面の水滴は、回転と滑りにより運動することが分かっている。実用化された撥水表面では、特に回転運動が支配的なため、回転運動による抵抗を考慮する。回転抵抗は、水滴の高さ方向の速度勾配と水滴の面積に比例すると考え、回転抵抗 F_{vis} :

$$F_{vis} \propto \mu \frac{V}{R} R^2 = \mu V R \quad (5)$$

で計算する。ここで、 μ は水の粘性、 V は水滴の代表速度、 R は水滴の高さである。

3.5 重力と垂直抗力

外力としてはほかに、重力と、ウィンドシールドから受ける垂直抗力を考慮する。垂直抗力はウィンドシールドへ食い込んだ場合に発生するペナルティ力を利用する。

3.6 風速と水滴加速度

表面科学分野で、風洞内に撥水基板を傾けて置き、撥水

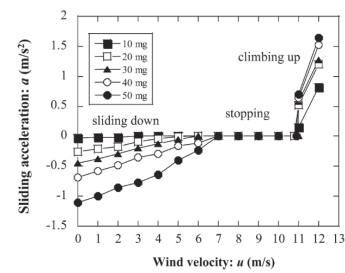


図3 各水滴サイズでの風速と水滴加速度の実測値 ([3] から抜粋)

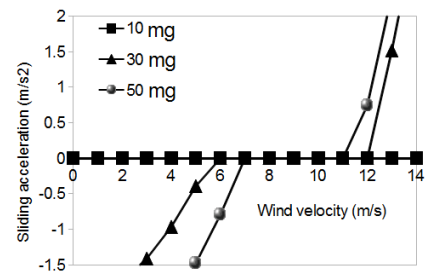


図4 提案法での、風速と水滴加速度

基板に付着させた水滴に風を当てた実験がある[3]。その実験結果から、風速と各種サイズの水滴の加速度との関係が分かっている(図3)。風速が低い時、この例では約7m/s以下の時、水滴は転落区間に入っている。それより風速が速く、かつ約11m/s以下の時、水滴は停止区間に入る。さらに風速が速いと水滴は上昇区間に入る。これは、撥水フロントガラスに付着した水滴がある速度でいっせいに除去される現象に対応する。この時、水滴の大きさとその加速度には正の相関がある。

一方の提案法では、水滴に関する力として以下を考慮した。

- F_{air} : 空気抵抗
- F_{hys} : 接触角ヒステリシス
- F_{roll} : 回転抵抗
- F_g : 重力
- F_n : 垂直抗力

図4は風速と水滴加速度の計算結果である。図3の実測値にある水滴の降下区間、停止区間、上昇区間を再現することが分かる。

3.7 水滴の衝突

表面張力により水滴の内部にはラプラス圧 ΔP :

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad (6)$$

がかかる。ここで、 γ は水の表面張力、 R は水滴の半径である。ラプラス圧により水滴が小さいほど内圧が高くなる。このためサイズの違う水滴が衝突すると、小さな水滴は大きな水滴に取り込まれる。水滴の衝突判定の実装時に、この現象を考慮した。

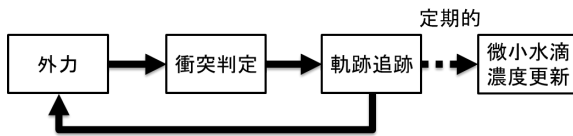


図 5 シミュレーションの各ステップ

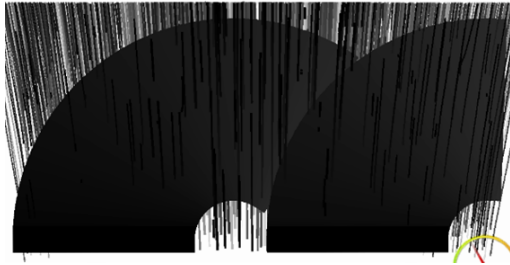


図 6 水滴/ワイパーの軌跡

3.8 雨滴の粒径分布

提案法では雨の中に含まれる水滴 (雨滴) の直径を考慮して水滴の生成を行う。雨滴の粒径分布モデルとして、マーシャル・パルマー分布 [7] N_D :

$$N_D = N_0 e^{-\Delta D} \quad (7)$$

が知られている。ここで、 D は粒径、 N_0, Δ は雨量に関連した係数である。粒径 D_{min} から D までの単位体積あたりの水滴数 n は、 N_D を積分することで

$$n = n(D_{min}, D) = \int_{D_{min}}^D N_D dD \quad (8)$$

となる。この逆関数を取り、 n ($0 \leq n \leq n(D_{min}, D_{max})$) に関して一様にサンプリングすることで MP 分布に従った粒径 D ($D_{min} \leq D \leq D_{max}$) を得る。この関数を使用して水滴を生成する。

4. 実装

この章では、前章の提案法の実装について述べる。提案法を現在広く使われるゲームエンジン Unity 上に実装した。物理シミュレーションは Unity が内蔵する NVIDIA PHYSX で行った。

4.1 水滴の物理シミュレーション

水滴は、球の剛体として実装し、剛体の回転を制限することで質点として扱った。水滴のシミュレーションの各ステップは図 5 のようになる。まず、質点水滴の外力を計算する。次に、水滴同士、または水滴とフロントガラスとの衝突判定を行う。水滴同士の衝突時は、水滴を融合しより大きな水滴で置き換える。水滴とフロントガラスの衝突時は、その衝突点を記録し、後述するレンダリング時に使用する。

4.2 微小水滴の濃度分布

霧や霧雨程度の粒径 (直径およそ $10\mu\text{m}$ から 1mm 以下)

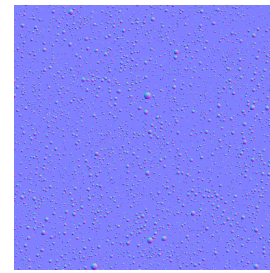


図 7 前計算した微小水滴分布 (法線マップの一部 (幅 10cm))



図 8 ロータス効果 (実写)

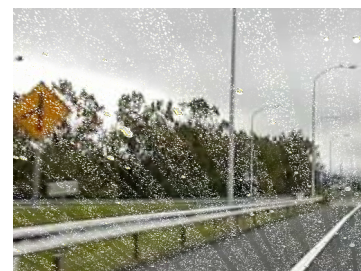


図 9 ロータス効果 (提案法)

を持つ水滴は、外力の影響を受けにくいいため動かない。動かない微小水滴の分布を前計算し、画像として記録しておく。具体的には、微小水滴の数として 1000 万の水滴を単位面積を持つ平面に降らせ、平面上で接した水滴の融合を行い、最終的に水滴数 200 万からなる微小水滴の分布を作成した。この分布を元に微小水滴の法線マップを作成した (図 7)。

また撥水表面では、質点水滴の移動によって微小水滴は除去されるため、軌跡にそって筋ができる。これをロータス効果と呼ぶ。ロータス効果の視覚化 (図 8, 図 9) をするため、水滴とワイパーの軌跡をアニメーション時にテクスチャとして記録し (図 6)、これを微小水滴の濃度分布として使う。この濃度分布を、後述する微小水滴のレンダリング時に使用する。

図 10 の点線で囲んだ部分は、濃度分布の撮影方法を表したものである。各撮影時に、テクスチャの Z バッファのみをクリアし、照明をテクスチャに着色混合、水滴とワイパーの軌跡をその手前に置く。これにより、水滴やワイパーの移動による微小水滴の除去と、微小水滴の濃度の雨により徐々に回復する現象が表現できる。

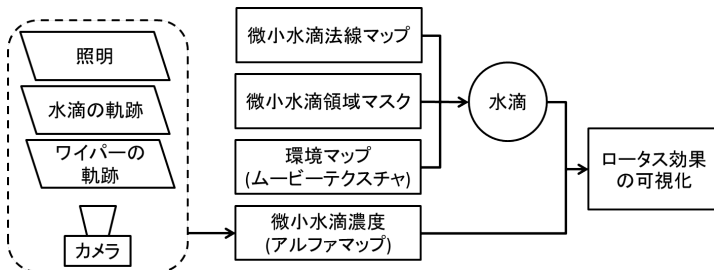


図 10 微小水滴の描画方法



図 12 風で除去される水滴

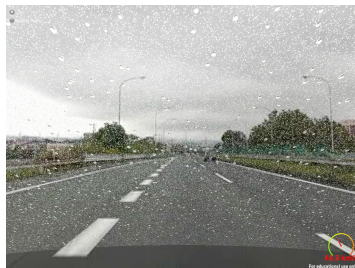


図 11 付着した水滴

4.3 水滴のレンダリング

3.1 節で、水滴を半球としてモデル化した。半球上の法線場を平面に投影し、法線マップとしてテクスチャ化する。法線マップで屈折方向ベクトルを計算し、背景映像を環境マップとしてサンプリングすることでレンダリングする。水滴はレンズのように光を集光するため、背景より明るく見える。屈折高のコントラストと明度をユーザー指定することでこれを表現した。

4.4 微小水滴のレンダリング

微小水滴のレンダリングは、微小水滴の画像をウィンドシールドに貼り、濃度分布に従った透明度を適用した上で、4.3 節の水滴と同じ方法で行う (図 10)。

4.5 実験環境

実験環境では CPU は Intel Extreme X9600 (3GHz)、ビデオカードは NVIDIA GeForce GTX480 を使用した。カメラは、視野角 75°、ウィンドシールドとの距離 50cm とした。ウィンドシールドは、傾斜 45°、幅 1m×高さ 0.5m、曲率半径は水平方向 5m とした。

5. 結果

図 11,12 はレンダリング例である。図 11(134-153FPS) は接触角ヒステリシスにより水滴が付着した計算例である。図 12(70-100FPS) は風で水滴が除去される例で、速度に比例して水滴が伸長していることがわかる。

6. おわりに

動的撥水性を考慮した水滴のリアルタイムアニメーション手法を提案した。また、市販のゲームエンジン (Unity)

に本手法を実装し、リアルタイム用途に応用可能であることを示した。

現在は、水滴の形状を円形に固定しているが、動的な表面張力の計算を行い、水滴の分裂、融合、変形などを統一的に扱うことで写実性をさらに向上できると考えられる。

また風についても、現在は前方から流れることを仮定しているが、横風や乱流などを考慮することで水滴の複雑な挙動を表現できると考えられる。

参考文献

- [1] A. Carre and M. E. R. Shanahan. Drop Motion on an Inclined Plane and Evaluation of Hydrophobia Treatments to Glass. *The Journal of Adhesion*, Vol. 49, No. 3-4, pp. 177-185, 1995.
- [2] Hang Ding and Peter D. M. Spelt. Onset of motion of a three-dimensional droplet on a wall in shear flow at moderate Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 599, pp. 341-362, March 2008.
- [3] Ayako HASHIMOTO, Munetoshi SAKAI, Jeong-Hwang SONG, Naoya YOSHIDA, Shunsuke SUZUKI, Yoshikazu KAMESHIMA, and Akira NAKAJIMA. Direct Observation of Water Droplet Motion on a Hydrophobic Self-assembled Monolayer Surface under Airflow. *Journal of the Surface Finishing Society of Japan*, Vol. 59, No. 12, pp. 907-912, 2008.
- [4] Kazufumi Kaneda, Shinya Ikeda, and Hideo Yamashita. Animation of water droplets moving down a surface. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 10, No. 1, pp. 15-26, 1999.
- [5] Kazufumi Kaneda and Takushi Kagawa. Animation of water droplets on a glass plate. *of Computer Animation*, pp. 177-189, 1993.
- [6] Kazufumi Kaneda, Yasuhiko Zuyama, Hideo Yamashita, and Tomoyuki Nishita. Animation of water droplet flow on curved surfaces. *Proceedings of Pacific Graphics*, pp. 50-65, 1996.
- [7] JS Marshall and W. McK. Palmer. The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, Vol. 5, pp. 165-166, 1948.
- [8] Huamin Wang, P.J. Mucha, and Greg Turk. Water drops on surfaces. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 24, No. 3, pp. 921-929, 2005.