

錆の生成過程を考慮した経年変化シミュレーション

鎌田 浩作[†] 石川 知一[†] 竹島 由里子[†] 柿本 正憲[†]

東京工科大学 メディア学部 メディア学科

1 はじめに

近年、コンピューターグラフィックス（以下、CG）の技術が向上したことにより、現実に近い表現が可能になっている。経年変化は現実に近いCGを制作するために重要な要素であり、経年変化の1つに金属による錆が挙げられる。

錆の生成の様子は、雨による水の付着、酸素量や流水の影響によって異なり、モデルの形状と化学反応過程を考慮した錆の生成モデルは存在しない。

本研究では、3D空間上で流体シミュレーションを行い3Dモデルと水の付着と流れを計算し、3Dモデルの表面上で進行する錆の様子をテクスチャ画像上で水の厚みと化学反応過程を考慮した錆の進行シミュレーションを行うことによって、現実で生成される錆に近い画像が得られることを確認する。

2 錆について

錆は腐食現象の1つであり、金属が腐食した結果として発生する。金属の腐食には「湿食」と「乾食」があり、金属が酸素と水により腐食することを湿食、空気などガス中で高温に曝される、化学薬品で腐食することを乾食という。本研究では日常的に発生する湿食に注目した。

錆は金属によって色が異なり、一般的に錆と呼ばれる鉄にできる赤錆、銅像などによくみられる銅にできる青錆、亜鉛やアルミニウムにできる白錆などがある。本研究では一般的な錆として知られている赤錆を扱う。実験として鉄板に水を流して、錆の生成過程を観察した(図1)。

3 関連研究

土井らの研究[1]では、セルオートマトン法を用いた錆の生成、進行シミュレーションを行っている。しかし、土井らの方法では水平面上しか考慮されておらず、傾斜角を考慮していない。

田邊らの研究[2]はこの問題を解決するために、傾斜角によって錆の進行方向、成長速度が変わるように改良を行った。

田中らの研究[3]はオブジェクト表面上に雨染



図1 実験で生成した錆

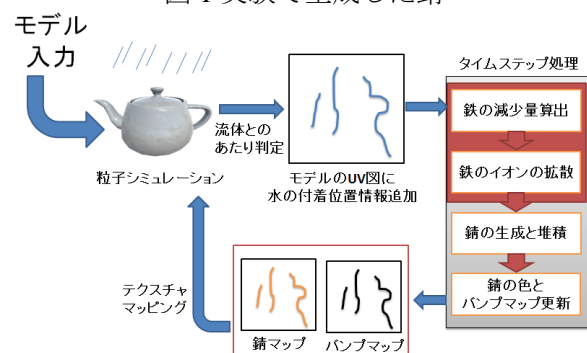


図2 全体の流れ

みを再現する手法を提案した。SPH法を用いて、水の付着力を考慮した雨染みの形状を生成した。

4 提案手法

4.1 全体の流れ

提案法の流れを図2に示す。提案システムの入力情報は3DモデルとそのUV展開図である。3Dモデルを空間中に配置し、粒子シミュレーションを行い、3Dモデルに粒子が触れた部分をメッシュ位置からUV展開図のどの部分に当たったかを水の付着位置情報として追加する。また、粒子は重力を考慮して移動させ、3Dモデルの内部に侵入した際には、衝突したメッシュから垂直抗力を受けることで、3Dモデルの表面を流れる様子を表現する。その後、水の付着位置をもとに2Dの錆シミュレーションを行う。2Dシミュレーションでは化学反応を考慮することで、錆の生成量と金属の腐食による凹凸を計算し、それぞれテクスチャとして出力する。これらのテクスチャを3Dモデルに適用することによって、錆の生成と進行が表現できる。

4.2 錆シミュレーション

粒子計算によって得られた3Dモデル表面における水の付着位置情報から、水中の溶存酸素濃度を算出する。溶存酸素濃度は、付着している

Aging simulation taking into account chemical reaction processes of rust

[†]Kosaku KAMATA, [†]Tomokazu ISHIKAWA,

[†]Yuriko TAKESHIMA, [†]Masanori KAKIMOTO

School of Media Science, Tokyo University of Technology

水の量が多いほど濃度が高いとする。溶存酸素濃度とあらかじめ設定した酸素の荷電数 β 、鉄の原子量 M 、経過時間 Δt から錆シミュレーションを行う。

鉄は空気や水に触れるとイオン化する。以下の式(1)、(2)は鉄のイオン化(鉄が失われた量(以下、重量損失))と電流密度の算出式である。

$$\Delta W = \frac{MIS\Delta t}{\alpha F} \quad (1)$$

$$I = \frac{\beta FDC}{\delta} \quad (2)$$

ここで、 α は反応する鉄の荷電数、 F はファラデー定数、 I は電流密度(式(2)により算出される)、 S は水が鉄に付着している表面積、 D は溶存酸素拡散定数、 C は溶存酸素濃度、 δ が拡散層の厚みを示す。

式(2)によって算出した重量損失から、鉄の厚みの減少量を以下の式で計算する。

$$\Delta H = \frac{\Delta W}{\rho S} \quad (3)$$

ここで、 ΔH は鉄の厚み減少量、 ρ は鉄の密度である。

次に鉄(II)イオンの拡散を以下の式で計算する。

$$\frac{\partial f(x)}{\partial t} = D_{Fe^{2+}} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \quad (4)$$

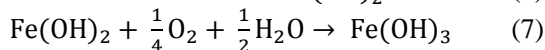
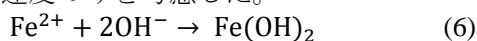
ここで、格子の任意の位置を x としたとき、 $f(x)$ は任意の場所における格子内の鉄(II)イオン濃度、 $D_{Fe^{2+}}$ は鉄(II)イオン拡散係数である。

拡散を終えたら、水酸化イオンの濃度 C_{OH^-} を算出する(式(5))。

$$C_{OH^-} = b \frac{M_{Fe^{2+}}}{V} \quad (5)$$

ここで、 b は鉄(II)イオンと水酸化イオンの生成比、 $M_{Fe^{2+}}$ は鉄(II)イオンの物質量、 V は水の体積を表す。

最後に赤錆が生成されるとき化学反応式(式(6)、(7))の反応速度を求め、タイムステップ辺りの生成量 v を求める(式(8))。本研究では沈殿物(水酸化鉄(II))の生成過程に注目して、主に式(6)による反応速度のみを考慮した。



$$v = k[Fe^{2+}][OH^-]^2 \quad (8)$$

ここで、 k は反応速度係数、 $[Fe^{2+}]$ は鉄(II)イオンの濃度、 $[OH^-]$ は水酸化イオンの濃度を表す。これを用いて赤錆の堆積量を算出する。

4.3 レンダリング

シミュレーション結果を反映するために、本研究では錆の量に応じた色を決定するカラーテーブルと凹凸のデータを用意する。シミュレーションによって算出された錆の堆積量と鉄の厚み減少量によって色と凹凸を変化させる。これ

により錆が堆積している場所ほど色が濃くなり、鉄が削れている部分は凹凸データから生成するバンプマップにより削れているように見える。

5 実験結果

本研究は、C++、OpenGL を使用し実装した。結果のレンダリングには Blender を使用した。使用した PC のマシンスペックは Intel CoreTM i7-4770 CPU 3.40GHz、12.0GB RAM である。シミュレーションにかかった時間は1タイムステップあたり9.3ミリ秒である。

結果画像(図3)を見ると、水滴が付着、伝っていった部分に対して錆が発生している。また、タイムステップを踏むごとに錆の色と凹凸が変わっていることが分かる。

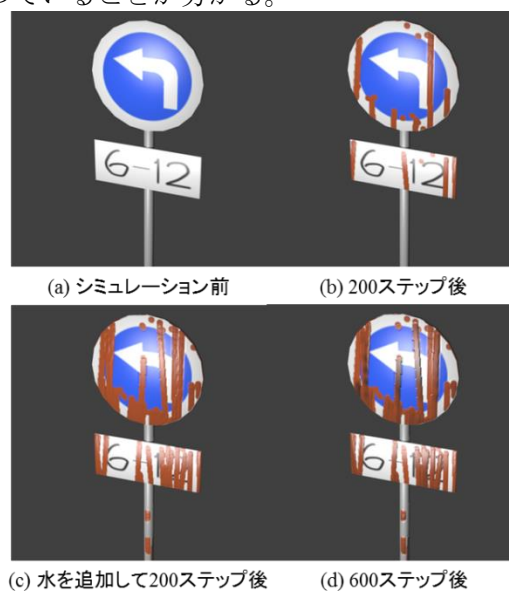


図3 シミュレーション結果

6 まとめ

今回の研究で、3D空間上にあるモデルに水を当て、錆を生成させることにより、3D空間上における錆の表現ができた。また、現実の化学反応過程と実際のデータ値を使用していることからより現実に近い錆を再現することができた。

7 参考文献

- [1] 土井宗義ほか：時間経過に伴う金属製品の錆成長のCGシミュレーションに関する研究、南山大学数理情報学部卒業論文要旨集(2009)
- [2] 田邊竜馬ほか：傾斜角を考慮した錆の経年変化テクスチャ、生成電子情報通信学会総合大会(2013)
- [3] 田中将貴ほか：粒子法による雨染みのシミュレーションのGPUによる高速化芸術科学会論文誌, Vol. 12, No. 3, pp. 124-131(2013)