

2013年度 卒業論文

水の付着を考慮した
錆の進行シミュレーション

指導教員：渡辺 大地 講師
三上 浩司 准教授

メディア学部 ゲームイノベーション プロジェクト
学籍番号 M0110341
萩原 啓

2013年度 卒業論文概要

論文題目

水の付着を考慮した
錆の進行シミュレーション

メディア学部

学籍番号：M0110341

氏名

萩原 啓

指導
教員

渡辺 大地 講師
三上 浩司 准教授

キーワード

錆、腐食、シミュレーション、経年変化、テクスチャ

近年、コンピュータグラフィックスの技術が向上したことにより、実写とほとんど区別がつかないほど現実味がある映像を制作することが可能になってきている。CGに現実味を持たせるためには、経年変化の表現は欠かせない。経年変化の1つとして金属が錆びる変化が挙げられる。錆の進行は金属がおかれている環境の影響で変化する性質がある。このことから錆は複雑な様相を持つため、現実に近い錆をCGによって制作するのは困難である。そこで、様々な環境を考慮した錆の進行シミュレーションの研究がある。

本研究では、雨などにより水が付着したとき、錆の進行が速くなる現象に注目した。錆は付着した水が中性だった場合、溶存酸素濃度にしたがって水の厚みが薄い場所から進行する性質を持っている。しかし、既存研究では、水の付着したときの錆の進行や水が付着したときに生成する鉄の凹凸の変化をシミュレーションする研究はない。そこで、本研究では水が付着したときの錆の進行をシミュレーションする方法を提案する。水の付着位置を指定し、経過時間を設定することでCGの鉄に錆を生成する。本手法と既存研究のシミュレーション結果、実際の錆を比較することで本研究の有用性を示した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	本論文の構成	5
第2章	錆について	6
2.1	錆の発生原理	6
2.2	鉄の腐食速度と錆の堆積量	8
第3章	錆シミュレーションの提案手法	11
3.1	提案手法の概要	11
3.2	水の付着位置の指定	13
3.3	鉄の減少量算出	14
3.4	鉄イオンの拡散	15
3.5	錆の生成と堆積	16
3.6	出力用データの作成	16
第4章	検証	19
4.1	シミュレーション条件	19
4.2	理論値との数値比較	20
4.3	画像比較	21
第5章	まとめ	24
	謝辞	25
	参考文献	26

目 次

1.1	鉄板に水を流してから5分後の実験画像	3
1.2	鉄板に水を流してから3時間後の実験画像	3
1.3	Julie Dorsey らのシミュレート結果	4
1.4	田邊らのシミュレート結果	5
1.5	凹凸の変化がある錆の実例	5
2.1	赤錆の参考画像	6
2.2	緑青の参考画像	7
2.3	溶存酸素の濃度勾配	10
3.1	空間の格子分割例	11
3.2	本手法のフローチャート	12
3.3	本手法の模式図	13
3.4	水の付着位置と水の厚みの指定例	14
3.5	溶存酸素の算出例	14
3.6	2次元の拡散例	16
3.7	錆の色データ作成に使用する色	17
3.8	錆の色データ作成例	17
3.9	凹凸データ作成に使用する色	18
3.10	凹凸データ作成例	18
4.1	厚み減少量の比較	20
4.2	Blender を利用した本手法の出力結果	21
4.3	セルオートマトン法の出力結果	22
4.4	実際に水が付着して進行した錆画像	22
4.5	錆画像とシミュレーション結果の比較	23

表 目 次

4.1	式 (2.8) に代入する値	19
4.2	式 (2.7) に代入する値	20
4.3	式 (2.9) に代入する値	20

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

近年、コンピュータグラフィックス(以下「CG」)の技術が向上したことにより、実写とほとんど区別がつかないほど現実味がある映像を制作することが可能になってきている。物質によって速度に差異はあるが現実の物体は劣化をしていくため、CGに現実味を持たせるために経年変化の表現は欠かせない。経年変化の1つとして金属が錆びる変化が挙げられる。錆は雨による水の付着など、環境の影響を受けたときに大きく変化する。このことから錆は複雑な様相を持つため、現実に近い錆をCGによって制作するのは困難である。そこで、金属がおかれている環境の影響を考えた錆の進行をシミュレートする研究がある。

まず、CGの表示領域を格子状に分割し、設定した規則によって進行させる「セルオートマトン」と呼ばれるシミュレーション方法[1][2][3][4]がある。土井ら[1]はセルオートマトンを用いて、金属製品の錆の進行をシミュレートした。田邊ら[2]は土井ら[1]の研究を拡張し、セルオートマトンを用いて、傾斜角を考慮した錆の進行をシミュレートした。この研究では、各セルに錆の発生確率と拡大レベル、色レベルのパラメータを与える。そして、1ステップ毎に各セルに対し、設定した確率を用いた錆の発生と既に錆が存在しているセルの周り1セルに対して錆の発生、もしくは拡大レベルの増加を行う。拡大レベルが設定値以上になった場合、色レベルが進行する。この時、錆の発生確率と拡大レベルの設定値は、実験

結果から著者らが目視で与えている。また、錆の存在しているセルが周辺のセルに影響を及ぼし、拡大レベルを増加する際に、与えられた角度の値から重力方向に重みづけすることで角度を考慮した錆の進行を表現した。

次に、初期条件で記号や形状を与え、それに対して繰り返し生成規則に基づき記号や形状を変化させることで、様々な自然物の構造を表現できる「L-System」という手法を用いたシミュレーション方法 [5] が挙げられる。Chang ら [5] は L-System を用いて、海水中の錆の進行をシミュレートした。CG の 3 次元形状モデル (以下「モデル」) は複数のモデルを構成する多角形 (以下「ポリゴン」) によって作られているが、Chang らは各ポリゴンの各頂点に対し、物理量を持たせ、L-System によって物理量を更新している。また、錆に 1 から 15 の進行レベルを設定し、その値まで成長したら、錆によってできる割れや穴あきを生成する。錆の進行レベルの増加は、一定方向からの海流を一定方向から当たる光の明るさで表現し、各頂点の明るさから進行レベルの増加量を決めることで行う。そして、一定方向から当たる光の明るさを経過時間によって変えることで、海水中の錆進行シミュレートをしている。

また、経年変化に関連する研究として金属が物体の表面から剥離するシミュレーション [6][7] と水が流れるときに汚れを運び、別の箇所へと汚れを付着させる水汚れのシミュレーション [8][9][10] がある。Julie らは金属の剥離による変色のシミュレート [6] を拡張し、水汚れによる景観変化の研究 [8] をした。この研究では、汚れを粒子として表現している。まず、モデル上に汚れの粒子を付着させている。そして、汚れの粒子をモデル表面上に流れる水の粒子によって流す。そこで、流された汚れを水の粒子がモデルに吸収される場所、もしくは太陽光によって水の粒子が蒸発した場所に再付着させることで、水汚れのシミュレートを行った。

これまでの錆の進行をシミュレートする研究では、一様な水分下でシミュレートを行っている。そのため、水が部分的に付着した時に錆が水の厚みが薄い場所から進行していく性質を再現することができていなかった。また、水汚れの研究では、水の付着が考慮されているが、水の厚みが薄い場所から錆が進行する性質

を再現できていなかった。図 1.1 と図 1.2 は本研究の予備実験で 60° の角度をつけた鉄板に水を流し続けたときの画像である。図 1.3 は水の流れから汚れが水の外側へ広がっていく Julie らのシミュレーション方法とその結果画像である。図 1.2 では水の厚みが薄い外側から内側に錆が進行していることが見て取れる。



図 1.1: 鉄板に水を流してから 5 分後の実験画像



図 1.2: 鉄板に水を流してから 3 時間後の実験画像

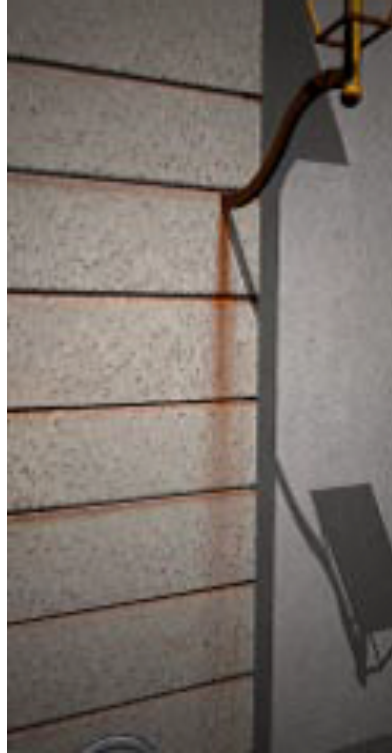


図 1.3: Julie Dorsey らのシミュレート結果

また、錆が進行すると、鉄が削れて錆が堆積するため、鉄表面に凹凸が生成する。水が部分的に付着して錆が進行した時、鉄表面の凹凸は水が付着していないときの錆の進行よりも顕著に表れる。しかし、これまでの研究では、水が付着したときに生成した錆による凹凸の変化を考慮しているシミュレートがなかった。図 1.4 は田邊らのシミュレート結果画像、図 1.5 は凹凸の変化がある錆の実例である。

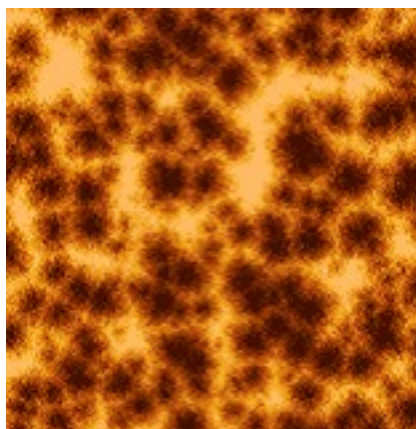


図 1.4: 田邊らのシミュレート結果



図 1.5: 凹凸の変化がある錆の実例

そこで、本研究では、水が部分的に付着した時に進行する錆をシミュレートすることを目的とする。

1.2 本論文の構成

本論文は全 5 章で構成する。2 章で錆の発生原理とその特徴について述べる。3 章で本研究の提案手法を述べ、4 章で検証とその評価を行い、5 章でまとめと今後の展望について述べる。

第 2 章

錆について

2.1 錆の発生原理

化学反応の中でも、反応前の物体から反応後の物体が生成される過程で、原子や化合物間で電子のやりとりがある反応のことを、酸化還元反応 [11][12] という。金属と酸素や水分などと酸化還元反応をおこして生成する物質が錆と呼ばれ、鉄からは赤錆や黒錆、銅からは緑青、スズやアルミニウムからは白錆等の錆が生成される。図 2.1 は、鉄から生成された赤錆の参考画像であり、図 2.2 と銅から生成された緑青の参考画像 [13] である。

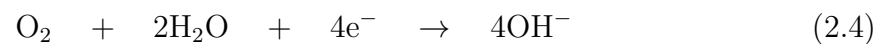
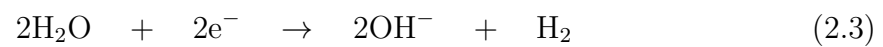


図 2.1: 赤錆の参考画像



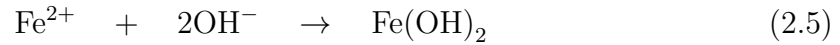
図 2.2: 緑青の参考画像

本研究では鉄に生じる錆の中でも代表的な赤錆を生成するシミュレートを行う。赤錆が生成するまでの反応は以下の通りである [12][14]。

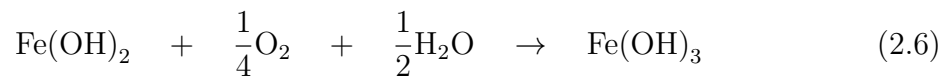


式 (2.1) は水分が鉄 (Fe) に付着し、鉄から電子 (e^{-}) が生成される酸化反応を表す。また、鉄から電子が生成されるときに水分が電子を受け取る還元反応が式 (2.2)、式 (2.3)、式 (2.4) である。この反応では鉄が電子を生成し、水分が電子を受け取るという反応が起こっているため、電子の流れから電流が生じている。つまり、鉄板表面に水分が付着し、鉄 (Fe) が鉄イオン (Fe^{2+}) に変わって鉄板表面から水中に

溶けだしていく反応(以下「腐食反応」)は電流の大きさからどの程度進行するか計算することができる [16]。



式(2.3)(2.4)の反応では水酸化物イオン(OH^-)が生成されている。また、式(2.5)鉄表面から水中に溶けだした鉄イオンと水分中の水酸化物イオンが反応する事で水酸化鉄(II)が生成される。



水酸化鉄(II)が水素、水分中の酸素(以下「溶存酸素」)と反応して赤錆と呼ばれる水酸化鉄(III)($\text{Fe}(\text{OH})_3$)が生成され、鉄表面に堆積していく。

2.2 鉄の腐食速度と錆の堆積量

鉄に水が付着している時に腐食反応が進行する速度(以下「腐食速度」)は、酸化還元反応時に流れている電流から求めることができる。そこで、電流*i*と鉄が失われた量(以下「重量損失」) ΔW の関係式(2.7)から腐食速度を求める [15]。

$$\frac{\alpha F \Delta W}{M} = i S \Delta t \quad (2.7)$$

ここで、 α は反応する鉄の荷電数、 F はファラデー定数、 ΔW は重量損失、 M は鉄の原子量、 i は電流密度、 S は水が鉄に付着している表面積、 Δt は経過時間となっている。

式(2.7)の ΔW を計算すれば、 Δt の間にどれだけ腐食反応が進行しているかを求めることができる。式(2.7)において、 ΔW を求めるために定まっていない値は、 i 、 S 、 Δt である。本研究では、 S と Δt をパラメータ値として設定した。よって、 i を求めることで Δt 時間における ΔW を求めることができる。

鉄に付着している水がpH=7で中性の時、 i は式(2.8)で求まる [16]。

$$i = \frac{\beta FDC}{\delta} \quad (2.8)$$

ここで、付着している水の温度が 25℃ の場合、 β は酸素の荷電数、 D は溶存酸素が 1 秒間に 1cm^2 を拡散していく量を表す定数である溶存酸素拡散定数、 δ は拡散層の厚み、 C は溶存酸素濃度を表す。拡散層とは、鉄の酸化還元反応によって酸素が消費され、溶存酸素濃度に勾配ができる距離のことである。

式(2.8)において、定まっていない値は C と δ である。本研究では、 δ をパラメータ値として設定した。つまり、 $\text{pH}=7$ 、温度が 25℃ のときの電流密度 i は溶存酸素濃度によって決定される。溶存酸素は鉄表面でただちに腐食反応を起こすため、鉄表面付近での溶存酸素濃度は 0 となる。また、Fick の第一法則 [17] により、化学物質の濃度にむらがあるとき、化学物質は濃度を均一にするように濃度に比例して拡散していく。溶存酸素濃度は鉄表面付近が濃度 0、水と大気が触れている境界面から拡散層までが濃度最大となるので、Fick の第一法則から鉄表面から拡散層までは距離に比例して濃度が上がっていくようになる [18]。図 2.3 は溶存酸素濃度が鉄表面からの距離に比例して変わっていくことを表したグラフである。ここで、図 2.3 の溶存酸素濃度の単位 (ppm) は 1ppm で 1ℓ あたり 1mg を表す [19]。

同じ水が付着している場所でも水の厚みが薄い場所の方が鉄表面付近の溶存酸素濃度が高くなる。鉄表面付近の溶存酸素濃度が高くなると酸素が多く供給されるので電流密度が高くなる。電流密度が高くなると鉄の重量損失が多くなるので腐食反応が速くなる性質がある。

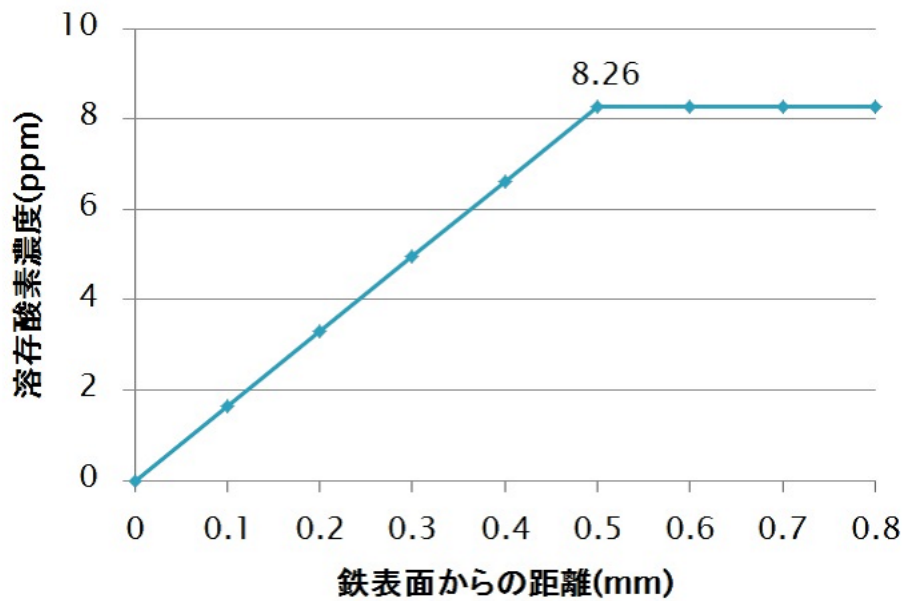


図 2.3: 溶存酸素の濃度勾配

鉄の重量損失が求まると、水中に溶けだした鉄の量が分かるため、水溶液中の鉄(Ⅲ)イオンの濃度を求めることができる。赤錆である水酸化鉄(Ⅲ)の反応速度 v (mol/s) は以下の式で計算できる [20]。

$$v = k[\text{Fe}^{3+}][\text{OH}^{-}]^3 \quad (2.9)$$

ここで、 k は反応速度係数、 $[\text{Fe}^{3+}]$ は鉄(Ⅲ)イオンの濃度、 $[\text{OH}^{-}]$ は水酸化物イオンの濃度を表す。式(2.9)で求めた反応速度 v は赤錆が単位時間に堆積する量を表しており、これによって赤錆の堆積量が算出できる。

第 3 章

錆シミュレーションの提案手法

3.1 提案手法の概要

本研究では鉄に水を付着したことで生成される錆の進行をシミュレートすることを目的とする。本手法では経年変化により劣化していない初期状態の鉄を格子によって表現する。この鉄に対し、水が付着した際の時間経過による化学反応の素過程を考慮した錆の進行を計算する。

また、本手法では3次元空間を格子状に区切り、格子毎にシミュレートを行う。各格子の大きさは現実の大きさに一辺を 0.1mm の立方体に設定している。図 3.1 は空間を区切り、計算を行う各格子の例を表示したものである。

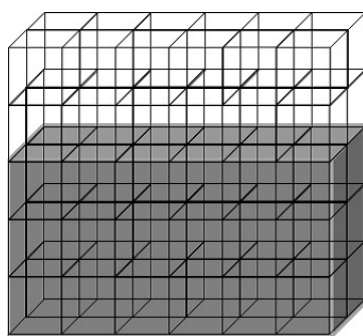


図 3.1: 空間の格子分割例

シミュレーション環境上に水の付着位置を指定する。ここで指定により付着する水は 25℃で pH=7 の中性水とする。付着した水には溶存酸素があるので、Fick

の第一法則から溶存酸素濃度を求める。式 (2.8) からわかるように、鉄表面の腐食速度を求めるために必要な電流密度は、鉄と接している水の溶存酸素濃度から求めることができる。腐食速度が決定すると、鉄に付着している水中に溶けだす鉄(III)イオンの量が算出できる。溶けだした鉄イオンの量から鉄の濃度を求める。また、物質の濃度が一様ではない場合は濃度が高い場所から低い場所へと物質の拡散が起こる (Fick の法則)[21]。よって、鉄表面付近に溶けだした鉄イオンを水中で拡散する。拡散した鉄イオンの量から鉄の濃度を求め、赤錆 ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) へと反応する速度を求める。ここで、鉄の腐食量を考慮して鉄の領域を再描画し、赤錆の堆積分も描画する。

ここまでの計算を1ステップとし、以降はこのステップを繰り返すことでシミュレーションを行う。図 (3.2) は本手法の全体的なフローチャート、図 (3.3) はシミュレーションの模式図である。

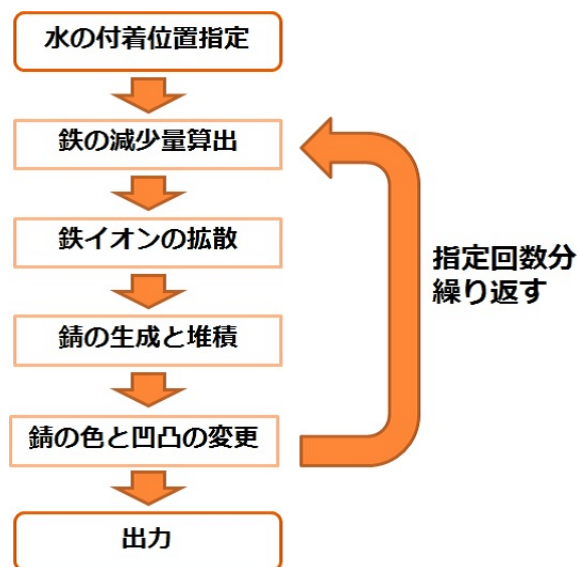


図 3.2: 本手法のフローチャート

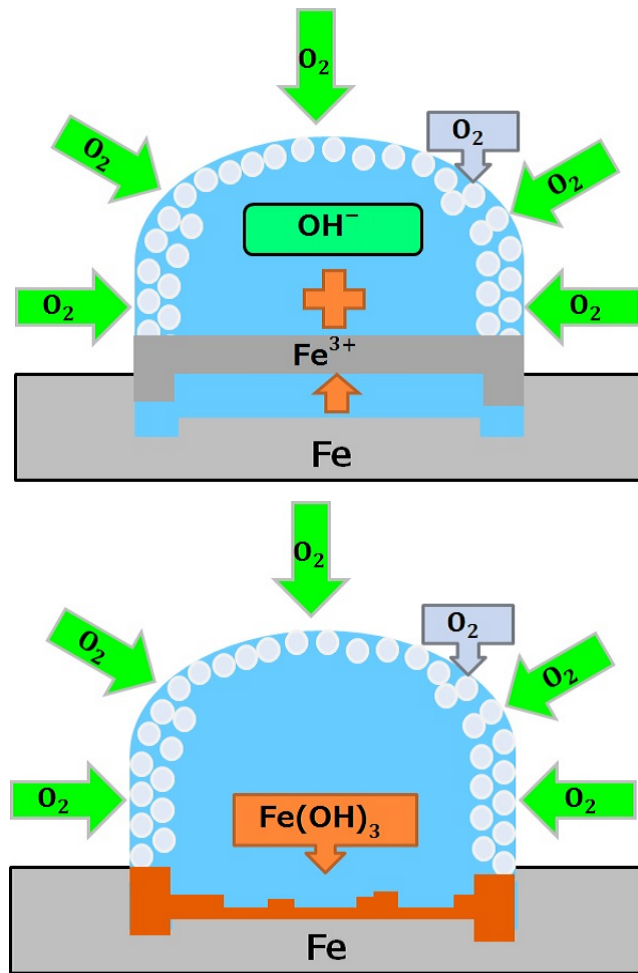


図 3.3: 本手法の模式図

3.2 水の付着位置の指定

水の付着位置と水の厚みを指定する。水の付着位置と厚みは格子単位で指定する。図 3.4 は水の付着位置と水の厚みを指定したときの例である。

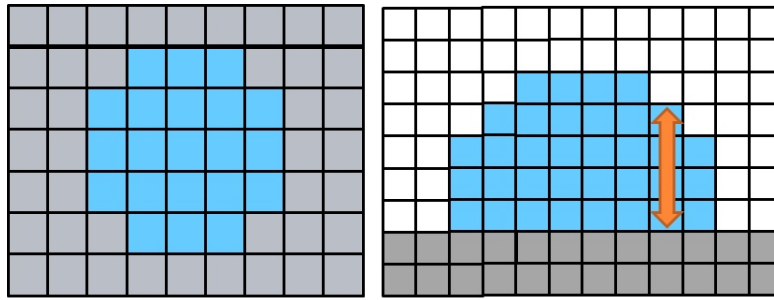


図 3.4: 水の付着位置と水の厚みの指定例

3.3 鉄の減少量算出

付着した水の厚みから Fick の第一法則にしたがい、水中の溶存酸素濃度を算出する。本研究では鉄表面から垂直方向の距離が拡散層の厚み 0.5mm 以上の場所は酸素が飽和していると考え、その場所の溶存酸素濃度は、最大値である $8.26\text{ppm} = 2.58 \times 10^{-7}(\text{mol}/\text{cm}^3)$ とした [18]。また、鉄表面から垂直方向の距離が 0.5mm 以下の場所の格子は溶存酸素濃度の最大値から鉄表面との距離に比例することによって濃度を算出する。水の厚みが 0.5mm 以下の場合、溶存酸素濃度は鉄表面から一番距離が離れている場所を最大値とし、距離に比例した濃度に設定する。図 3.5 は溶存酸素濃度の算出例である。図 3.5 は緑色の濃い場所が溶存酸素濃度が高く、色の薄い場所の溶存酸素濃度が薄くなっている。

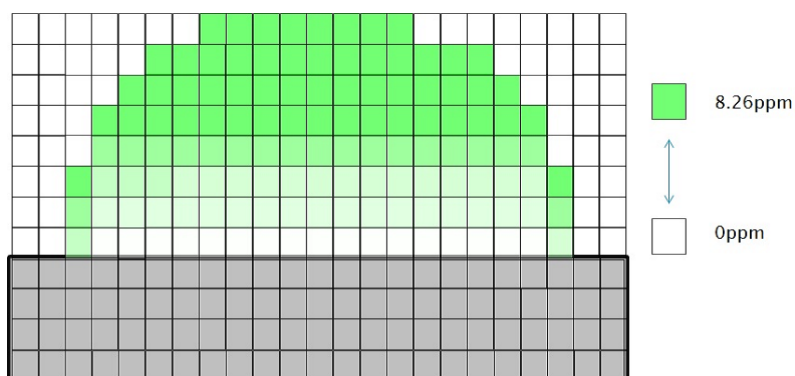


図 3.5: 溶存酸素の算出例

算出した溶存酸素濃度から水と接している鉄がある場所の電流密度を式 (2.8) で求める。また、求めた電流密度を式 (2.7) に代入し、鉄の重量損失を求める。ここで求めた重量損失から式 (3.1) によって鉄の厚みの減少量を計算する。

$$\Delta H = \frac{\Delta W}{\rho S} \quad (3.1)$$

ここで、 ΔH は鉄の厚み減少量、 ρ は鉄の密度、 S は水が付着している鉄の面積である。

3.4 鉄イオンの拡散

3.3 節で求めた重量損失は鉄が鉄表面から失われた量であるが、これは水中に溶けだした鉄イオンの量と同じである。水中に溶けだした鉄 (III) イオンは溶けだした鉄表面付近から鉄 (III) イオン濃度の低い水中に拡散していく。このとき、鉄イオンの拡散は 3 次元の拡散方程式 (3.2) を離散化した式 (3.3) にしたがって行う [21]。

$$\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial t} = D_{\text{Fe}^{3+}} \left(\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(y)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f(x, y, z)}{\Delta t} = & -d(6f(x, y, z) - f(x + \Delta x, y, z) - f(x - \Delta x, y, z) - f(x, y + \Delta y, z) \\ & - f(x, y - \Delta y, z) - f(x, y, z + \Delta z) - f(x, y, z - \Delta z)) \end{aligned} \quad (3.3)$$

ここで、格子の任意の位置を (x, y, z) としたとき、 $f(x, y, z)$ は任意の場所における格子内の鉄 (III) イオン濃度、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は現実における 1 格子の縦、横、高さ方向のサイズ、 $D_{\text{Fe}^{3+}}$ は鉄 (III) イオン拡散係数である。拡散方程式は注目している格子の濃度と x, y, z 軸に隣り合った格子の濃度を比較し、注目している格子の濃度を変化するというものである。図 3.6 は本手法で用いる拡散方法を 2 次元上で表現したもので、格子内の数値は鉄の濃度の初期値として 100 の値を与えたときに拡散していく数値を表している。

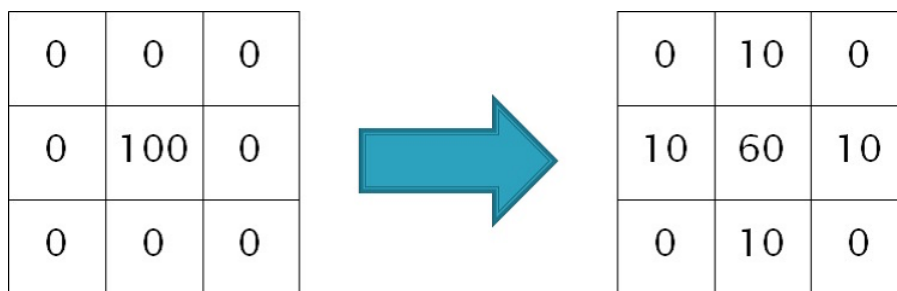


図 3.6: 2次元の拡散例

3.5 錆の生成と堆積

鉄(III)イオンの物質量から水中の鉄(III)イオンの濃度を式(3.4)によって求める。

$$C_{\text{Fe}^{3+}} = \frac{M_{\text{Fe}^{3+}}}{L} \quad (3.4)$$

ここで、 $M_{\text{Fe}^{3+}}$ は鉄(III)イオンの濃度、 L は水の体積を表す。式(3.4)によって求めた鉄(III)イオンの濃度と pH 値によって求めた水酸化物イオンの濃度から水酸化鉄(III)の反応速度を求める。ここで、反応速度は式(2.9)によって求める。反応速度から算出した錆の反応量を格子の重力方向に落下して、錆を堆積する。また、堆積した錆は風や水の流れ、落下による移動 [23] が考えられる。この現象を表現するために、各格子の堆積量の 1 割をランダムで周囲の格子 1 マスに移動する。

3.6 出力用データの作成

本手法では、シミュレート結果出力をするためにテクスチャ用の色データ、バンパッピング用の凹凸データを作成する。

一般的に現実において、色の濃さは色がついている場所が多いほど濃く見え、色がついていない場所が少ないほど薄く見える。そこで、本手法では堆積した各格子の錆の色を錆の付着量に応じて変化する。錆の色は付着量が多くなる程、赤茶色から黒色に近づけていく。図 3.7 は本手法で使用する錆の色、図 3.8 は錆の色データ作成例である。



図 3.7: 錆の色データ作成に使用する色

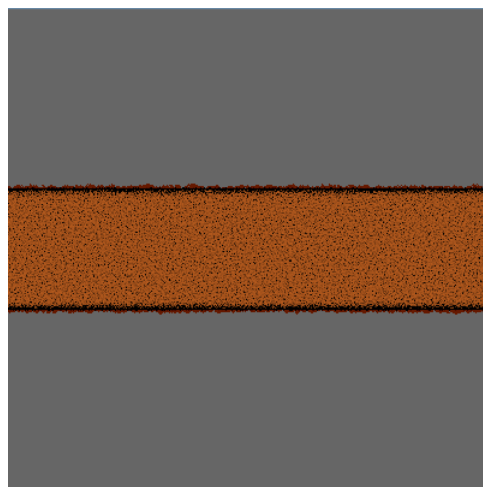


図 3.8: 錆の色データ作成例

凹凸データは、鉄の厚み減少量と錆の堆積量を加算した高さ情報から作成する。バンプマッピングで利用するために高さ情報を白と黒の色で表現する。初期状態の鉄表面を高さの中央値の灰色とし、初期状態の鉄表面より 5.0mm より低い場所の格子を黒色、5.0mm より高い場所を白色に設定した。図 3.9 は本手法の凹凸データ作成に使用する色の例、図 3.10 は凹凸データの作成例である。



図 3.9: 凹凸データ作成に使用する色

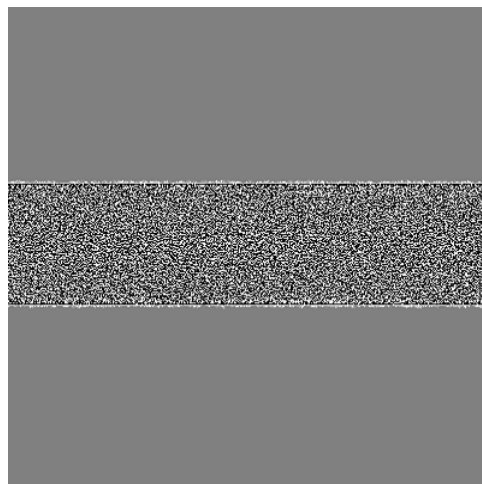


図 3.10: 凹凸データ作成例

第 4 章

検証

この章では、提案手法を利用することで得た出力結果と実際の錆、既存研究を比較し、本手法で水の付着による錆の進行が再現できているかを検証する。検証は凹凸の変化量を理論値と比較、景観の変化を画像で比較することで行う。今回は実装にグラフィックス API である OpenGL を利用した。

4.1 シミュレーション条件

今回、シミュレーション条件として 25 °C で pH=7.0 の中性水が楕円形で高さ 2mm、幅 4mm で鉄板に付着している状況を考える。各格子の大きさは現実において一辺が 0.1mm の立方体と設定し、縦 400、横 400、高さ 400 の格子数を空間として設定する。この状況下の時、式 (2.8) と式 (2.7) に代入する値を表 4.1、表 4.2、表 4.3 に示す。

表 4.1: 式 (2.8) に代入する値

酸素の荷電数 β	4.0
ファラデー定数 F	$9.65 \times 10^{-4}(\text{C/mol})$
溶存酸素拡散定数 D	$1.27 \times 10^{-5}(\text{cm}^2/\text{s})$
拡散層の厚み δ	0.05(cm)

表 4.2: 式 (2.7) に代入する値

鉄の荷電数 α	3.0
鉄の原子量 M	55.845(g/mol ⁻¹)
表面積 S	10 ⁻⁸ (m)
経過時間 Δt	1.0(s)

表 4.3: 式 (2.9) に代入する値

反応速度定数 k	0.5×10^{13}
------------	----------------------

4.2 理論値との数値比較

本手法を用いて鉄の腐食シミュレーションを行い、見た目変化の要因である厚み減少量を算出する。算出した厚み減少量と現実の腐食進行で減少する厚みの値を比較することで、本手法の腐食進行による厚み減少量の検証をする。水中で溶存酸素が飽和している場所(大気と水の境界面付近)の場合、式(2.8)の溶存酸素濃度 C は 2.58×10^{-7} (mol/cm⁻³)となる。この時、腐食反応による厚み減少の理論値と本手法のシミュレート結果は図 4.1 となる。

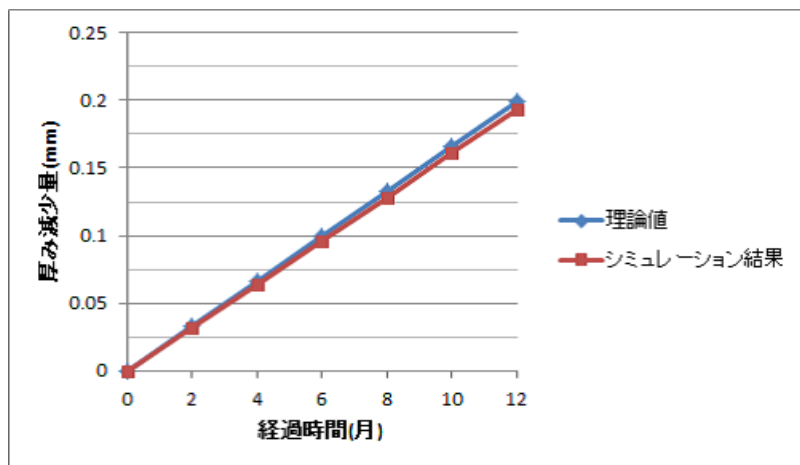


図 4.1: 厚み減少量の比較

水の付着による腐食進行は理論値で0.2mm/y程度、鉄の厚みが減少する[14][16][24]。また、本手法のシミュレーション結果では年間で0.192mm/y程度の鉄の厚みが減少している。本手法のシミュレート結果と腐食反応によって起こる厚み減少の理論値は近い値をとっているため、本手法の腐食反応による鉄の厚み減少は凹みを再現できていると言える。

4.3 画像比較

本研究のシミュレート結果と先行研究のセルオートマトンを用いた手法[1][2]、実物の錆びた鉄を撮影した画像を比較する。図4.2はBlenderのバンプマッピングを利用して出力したものである。また、図4.3は先行研究の提案手法をシミュレート条件である水の付着している位置と同じ位置に適用した結果画像である。実際に錆びた鉄を撮影した図4.4と図4.2、図4.3を比較した図4.5を見ると本手法のシミュレート結果が水の厚みが薄く、溶存酸素濃度が高い所(水と大気境界面付近)に錆が多くできており、水の付着を考慮していることが分かる。さらに、前節で検証した高さ情報を与えることで腐食進行による凹凸の変化も本手法で表現できている。

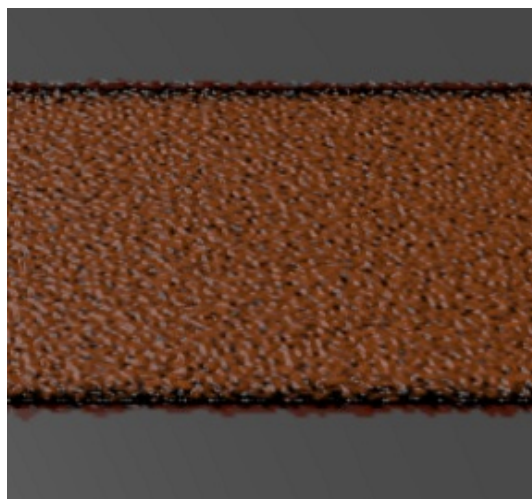


図 4.2: Blender を利用した本手法の出力結果

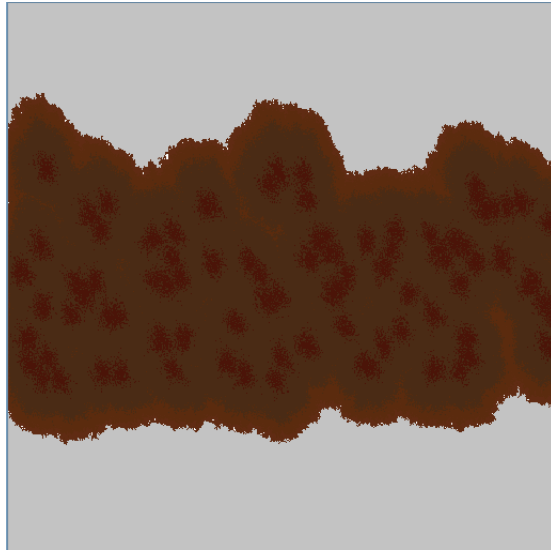


図 4.3: セルオートマトン法の出力結果



図 4.4: 実際に水が付着して進行した錆画像

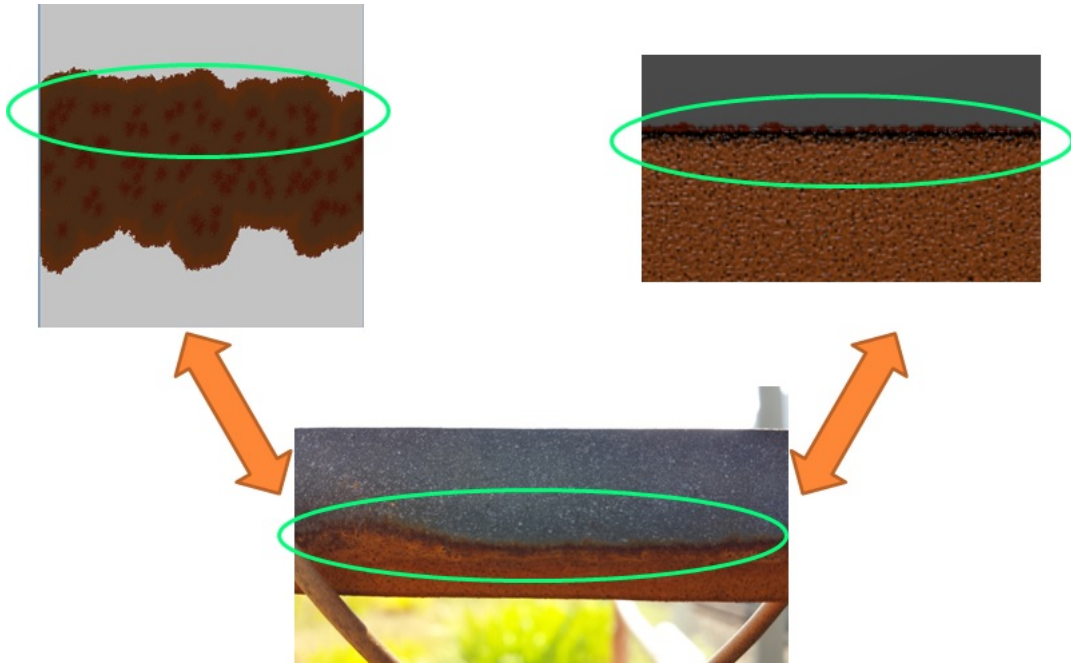


図 4.5: 鋳画像とシミュレーション結果の比較

第 5 章

まとめ

本研究では、水の付着した時に錆が溶存酸素濃度の高い、水と大気の境界面付近から進行が進み、変色していく様子とその時に起こる凹凸の変化について表現することを目的とした。そこで、本研究では化学反応の素過程を用いて錆の進行をシミュレートした。本手法を用いることで、水の付着した時に錆の進行が速くなり、水と大気が接している場所から錆が進行する性質が表現できた。また、錆が進行する時に起こる腐食反応による鉄の厚みの変化も今回の手法で表現することができた。だが、本手法の問題点として水の流れや pH 値の変化等のシミュレート環境の変化による進行の変化が考慮していないこと、局部腐食や不導体被膜の生成による進行速度の変化が考慮していないことが挙げられる。これらの問題点を解決することができれば、より現実に近い錆の進行をシミュレートすることが出来るだろう。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くのご指導をいただいた渡辺先生、三上先生、石川先生、阿部先生に深く感謝致します。また、論文の添削をしてくださった院生の皆様にも深く感謝致します。そして、相談に乗っていただいた研究室のメンバー、無理を言って実験用の鉄を譲っていただいた八木鉄工所の皆様、論文を譲っていただいた東京電機大学の田邊竜馬さんに感謝致します。最後に、挫けそうな時にいつも応援してくれた家族の皆様に深く感謝します。

参考文献

- [1] 土井崇義. 加藤直大. 金知俊. 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. 森谷友昭. 高橋時市郎. 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] 加藤恭義. 光成友孝. 築山洋. セルオートマトン法-複雑系の自己組織化と超並列処理-. 森北出版株式会社, 1998.
- [4] 森下 信. セルオートマトン 複雑系の具象化. 株式会社養賢堂, 2003.
- [5] Yao-Xun Chang.Zen-Chung Shin. The synthesis of rust in seawater. The Visual Computer. Vol.19 No.1 pp.50-66, 2003.
- [6] Julie Dorsey. Pat Hanrahan. Modeling and Rendering of Metallic Patinas. SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. pp.387-396,1996.
- [7] 鎌田悠太郎. 眞鍋佳嗣. 矢田紀子. 形状に基づく物理浸食再現マップの自動生成手法. 映像情報メディア学会冬季大会, 2012.
- [8] Julie Dorsey. Hans Kohling Pedersen. Pat Hanrahan. Flow and Changes in Appearance. SIGGRAPH, 2005.

- [9] 遠藤結城. 金森由博. 三谷純. 福井幸男. 粒子シミュレーションによる水汚れ画像生成システム. 筑波大学, 2010.
- [10] 田中将貴. 床井浩平. 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. 情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究会報告, 2011.
- [11] Ralph S.Becker.Wayne E.Wentworth. ベッカー 一般化学 (上). 東京化学同人,1993.
- [12] (有) コロージョン・テック. 腐食と防食のページ. <http://www3.kitanet.ne.jp/~corr-tec/>.
- [13] ゆん無料壁紙画像集. <http://wallpaper.free-photograph.net/jp/>.
- [14] 松島巖. トコトンやさしい錆の本. 日刊工業新聞社, 2002.
- [15] 電験 3 種/電気工学士/技術士/「資格の広場」<http://cgi.din.or.jp/goukaku/index.html>
- [16] Massy's Home Page. 腐食反応とその速度, <http://www.ne.jp/asahi/massycorr/massy/lecture/lecture.html>.
- [17] 田中一義. 物理化学 基礎の基礎 知っておきたい 103 のコンセプト. 化学同人, 2009.
- [18] 技術情報館 SEKIGIN. 淡水環境の腐食, http://sekigin.jp/03corro/02corro/01cor_steel/cor_steel_02.html.
- [19] Molly M.Bloomfield. Chemistry and the Living Organism. 丸善株式会社, 1995.
- [20] 阿藤質. 化学概説. 培風館, 1956.
- [21] 伊藤清三. 拡散方程式. 紀伊国屋書店, 1979.

- [22] William H.Press, Saul A.Teukolsky, William T. Vetterling,Brian P. Flannery.
NUMERICAL RECIPIES in C. 技術評論社,1993.
- [23] 青木隆一, 鈴木雅之. 安息角, 内部摩擦角, 空隙率に対する粒子の形状の影響日
本材料学会
- [24] 中山元, 榊原洋平. ”さび”の定量と”ひび”の予測, 株式会社 IHI 横浜事業所
技術開発本部基盤技術研究所基礎技術研究部 技報 Vol.51 No.4(2011)