

2011年度 卒業論文

リアルタイム 3DCG による  
水面周辺に生じる水濡れ表現に関する研究

指導教員：渡辺 大地 講師  
三上 浩司 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト  
学籍番号 M0108480  
吉田 広和

**2011年度 卒業論文概要**

**論文題目**

リアルタイム 3DCG による  
水面周辺に生じる水濡れ表現に関する研究

**メディア学部**

**学籍番号： M0108480**

**氏名**

吉田 広和

**指導  
教員**

渡辺 大地 講師  
三上 浩司 講師

**キーワード**

CG、水分浸透、透水現象、飽和、ハイトフィールド、水面

近年、3次元コンピュータグラフィクス（3DCG）の分野では、水流や爆発などの物理現象を表現する研究が盛んに行われている。中でも、身近に存在する水の表現はあらゆる場面で必要になるため、様々な状況に対しての表現手法がある。特に3DCGアニメーションやコンピュータゲームにおける、景観の一部としての水面の表現はコンピュータ性能の向上に伴い、より高精度のものとなってきた。しかし、水面の表現力が上がる一方で、地面との境界線が強く見えてしまうという問題は解決されていない。これは水面だけでなく地面の質感の変化を考慮していないためである。より現実味のある水面を表現するためには、相互に干渉する物体の変化も考慮すべきである。

本研究では、水による地面の質感変化を再現すべく、土質力学・土壌物理学での透水性を適応させた。また、含水量による飽和状態と、重力による浸潤速度を考慮し、水溜りの生成と水平でない面への適応を可能とした。本手法での処理は、テクスチャのピクセル単位でハイトフィールドを用いた処理をすることで地面の質感変化を表現した。これらの処理は描画までを全てリアルタイムで行うことを目標とした。本手法で生成した画像を元に、導入した要素が反映されているか検証を行った。その結果、実際の現象との類似性を挙げることができ、本手法の有用性を示した。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景と目的 . . . . .	1
1.2	論文構成 . . . . .	6
<b>第2章</b>	<b>提案手法</b>	<b>7</b>
2.1	透水性 . . . . .	7
2.2	飽和度 . . . . .	8
2.3	流体情報の取得 . . . . .	9
2.4	土壌情報の取得 . . . . .	10
2.5	現象のシミュレーション . . . . .	12
<b>第3章</b>	<b>検証と考察</b>	<b>15</b>
3.1	実装環境 . . . . .	15
3.2	シミュレーション結果を適応 . . . . .	15
3.3	考察 . . . . .	19
<b>第4章</b>	<b>まとめと展望</b>	<b>20</b>
	<b>謝辞</b>	<b>21</b>
	<b>参考文献</b>	<b>22</b>

# 目 次

1.1	水面形状の露呈	2
1.2	水面を地形に埋め込む方法	3
1.3	水面の境界線	3
1.4	単純な境界線	4
1.5	実際の水面付近の画像	5
2.1	水頭差による圧力	8
2.2	土壌における間隙	9
2.3	ハイトフィールド	10
2.4	ポリゴンの傾き方向と強さ	11
2.5	近傍セルの重力勾配値	12
2.6	流れによる含水量の変化	13
3.1	シミュレーション画像	16
3.2	含水量による段階分け	17
3.3	レンダリング	17
3.4	段階分けレンダリング	17
3.5	シミュレーション結果	18
3.6	段階分けシミュレーション結果	18
3.7	地形データの適応結果	19

# 表 目 次

3.1	実行環境 . . . . .	15
3.2	質感の段階分け . . . . .	17

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究背景と目的

コンピュータグラフィクス（以下 CG）を用いて物理現象を表現する試み [1][2][3] は、これまで着々と進歩を遂げている。特に、身近な流体である水の表現技術は CG アニメーション [4] やコンピュータゲーム [5][6] で頻繁に用いられるようになってきた。水のように様々な形態を持つ流体を、1つの技術で全て表現することは難しい。水面だけに着目しても、表面の波だけを計算する手法 [7][8] から水面下も含めた水全体の挙動を計算する手法 [9][10][11] と様々である。そのため、水の表現手法には個々の現象に対してのものが数多く存在する。

リアルタイム CG は描画までの処理を実時間で行う必要がある。そのため、流体の表現方法においても負荷の低いものが求められる。実際にリアルタイム CG を用いたコンピュータゲームにおける水の表現では、水面のみ描画する方法 [12] を用いることで負荷を低減している。Blinn[13] のバンプマッピングや Krishnamurthy ら [14] の物体の凹凸を表現する手法は水面の細波の表現に有用であるため、リアルタイム CG ゲームはこれらの手法を頻繁に用いている。ハードウェア性能が発展した現在では、より写実性の高い水面の表現が可能となった。

リアルタイム CG における水面の表現力が高まる一方、水面周囲で起こる現象にも表現力が必要となった。例えば、徳山ら [15] の水の集光現象により水面下に発生する光の網目模様に関する研究や、坂本ら [16] の路上の水溜りに侵入した車

が起こす水しぶきの研究がある。水面と関連した水面以外で発生する現象を表現することは、結果的に相互間の表現力の向上に繋がる。そのため、リアルタイムCGゲームにおいても水面周囲で起こる現象を表現する試みがある。

前述の通り、リアルタイムCGでは水面を描画することで水面下も含めた水全体を表現する方法が多い。この手法の多くは、水面の形状には単純な簡易モデルを用い、マッピングによる詳細な形状表現を施すことで、結果的に複雑な形状として認識するものである。しかし、水面の縁では本来の人工的な形状が露呈してしまうという問題がある。図1.1は単純な形状による水面の縁を表した図である。水面形状の縁以外の部分では、テクスチャにより自然な水面表現が出来ている。しかし、水面形状の縁では形状の輪郭線が露呈してしまい、簡易モデルによる表現の弱点が現れてしまう。

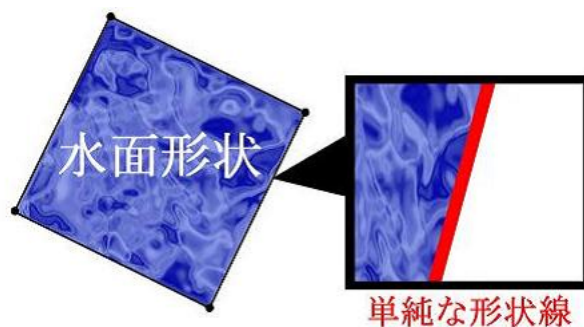


図 1.1: 水面形状の露呈

水面形状の露呈を防ぐためには、水面形状を地形に埋め込む方法がある。この方法により、水面形状の端を地形形状で隠すことが可能となる。図1.2は水面を地形に埋め込む方法を説明する図である。

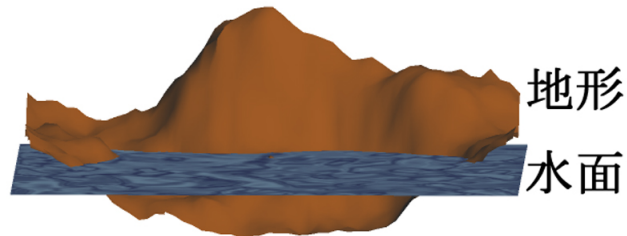


図 1.2: 水面を地形に埋め込む方法

前述の方法では、水面形状と地形形状の交わりにより新たな境界線が発生する。そして、この境界線を実質的な水面の境界線として認識することになる。図 1.3 は水面と地形の境界線を表した図である。

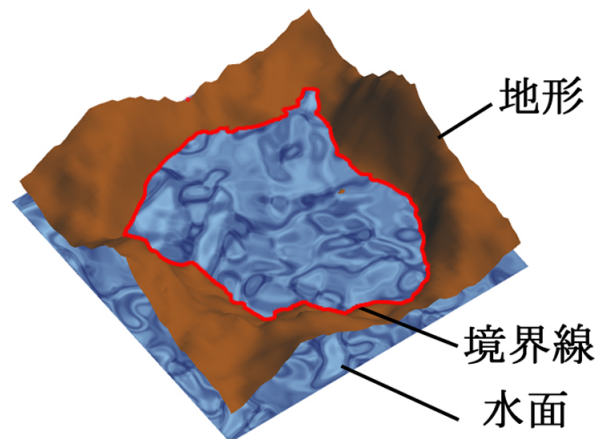


図 1.3: 水面の境界線

水面と地形の境界線は、両者の形状に依存することが分かる。つまり、両者とも単純な形状の場合、発生する境界線も単純なものとなる。その様子を図 1.4 に



示す。

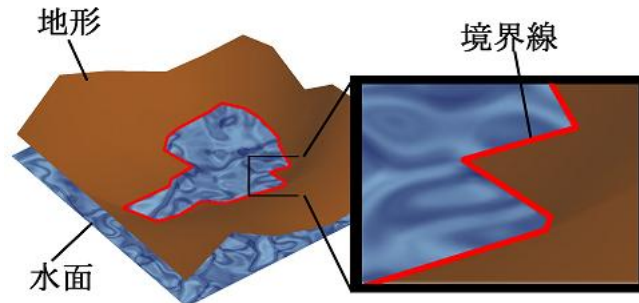


図 1.4: 単純な境界線

このような境界線は、実際の水面と地面の境界線では発生しない。完全に平坦な場合を除き、地面には凹凸があるため境界線は複雑な形になる。ところがリアルタイム CG では、水面同様に地面にもバンプマッピングなどの疑似的な表現手法を用いて描画することがある。そのため、境界部分は単純な面同士の交わりによる、単純な境界線が発生する。その結果、水面と地面の質感変化の境界も単純なものとなってしまい、臨場感を損なうことになる。この問題においては、Z補正バンプマッピング [17] を用いることで場合によっては改善できる。しかし、水面と地面の質感が突然変化する不自然さは改善できない。実際の水面付近では、水と土壌の性質による現象が発生する。図 1.5 は実際の水面付近の画像である。地面の材質が土の場合、土が水分を保有するために地面の色が変わる現象が起こる。この現象の 1 つとして、透水現象が挙げられる。

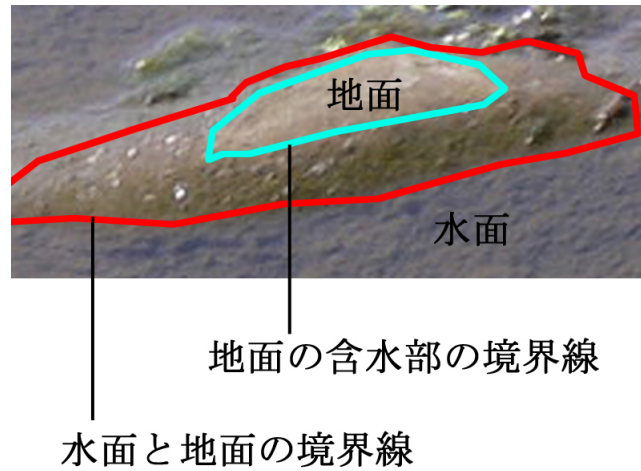


図 1.5: 実際の水面付近の画像

透水現象により、土壌の含水部は光の屈折率が低下するため明度が下がる。水面から乾いた地面までの範囲ではこの現象が起きている。つまり、水面を表現する場合は、周辺で発生する透水現象による水濡れも表現することが必要である。そこで、本研究では水面周辺の地面で生じる透水現象に着目した。本論文では、透水現象を土などの物体が水を通す現象と定義する。また、水が土などの物体を通ることを浸透するという。本研究では水面周辺で起こる透水現象をリアルタイムCGで表現することを目的とした。

透水現象は、自然界では気流や降雨による水分移動が常時起きているため、あらゆる場所で発生している。一般では土質力学・土壌物理学の分野が研究対象としている現象である。土の水平浸潤に関する研究では長谷川ら [18] の研究がある。透水性は、堤防やダムの建設時の安全性や、路面や競技場における水捌けの性能を説明する際に想定する必要がある物理要素である。この性質は数値で表すことが可能であり、実際に水を染み込ませることによって測定する。近年では、実験と並列して、コンピュータによる複雑な処理によるシミュレーションを行い、3DCGを用いて視覚化する。

Witawat ら [19] の研究では、リアルタイム CG における濡れた砂の挙動と見え

方を研究している。浸透は再現対象の1つとして挙げられており、その他濡れた砂の形状変化なども再現している。この研究ではパーティクルを用いてシミュレートしているため、負荷が高い。遠藤ら [20] のシステムでは水が物体の表面に作る汚れを再現している。この研究では、表面上の質感の変化という点で本研究との類似性がある。物体が水を吸収して飽和し、蒸発するという一連の現象の再現は本手法でも試みている。しかし、2次元画像を入出力することを前提としているため本研究で想定する3DCGでは直接扱うことは出来ない。

本研究では、透水現象を表現する手法を提案した。本手法はリアルタイムCGでの使用を想定し、ポリゴンに張り付けるテクスチャデータを書き換えることで透水現象を表現したため、パーティクルを用いた Witawat らの手法に比べ負荷が低く、有用性があるといえる。また、処理の一部では、透水係数や重力を考慮した染み込み、含水量による飽和・不飽和の状態変化を目標とした。染み込み表現は、地面テクスチャの色値を元に計算する。そのため、水分吸収による質感変化の境界は地面テクスチャに応じて変化する。蒸発に関しては、時間軸に沿って変化する擬似的な再現をした。計算結果は、テクスチャデータとして出力し、ポリゴンに張り付けて描画する。本手法に必要な入力値は、平面に対する水の流入位置と流入量のみであり、汎用性が高いといえる。そのため、既存の流体表現の手法への適応も容易に行うことが出来る。検証では、含水量を段階的に分けて描画し、飽和部分から外側に向かって徐々に含水量が減少していることを確認した。また、時間経過による透水や蒸発の現象が、重力の影響による変化をしていることを図によって示した。

## 1.2 論文構成

本論文の構成は以下の通りである。第2章では水分浸透の特性を説明し、第3章ではそれを踏まえてシミュレーションする手法を述べる。第4章では第3章で述べたシミュレーション手法からシミュレーションした例を示し、その結果と考察について述べる。第5章では本研究のまとめと展望を述べる。

# 第 2 章

## 提案手法

本手法では、以下の現象を対象とする。なお、ここでの流体とは一般的な水の性質を想定する。具体的には、流体の浸透・浸潤、流体の飽和・不飽和、そして蒸発による乾燥である。まず、水が地面を通る透水現象の要素を説明をし、CGで再現するために必要となる要素を明確化する。節 2.1 では透水性、節 2.2 で飽和度について説明する。以降、提案手法である節 2.3 で流体情報の取得、節 2.4 で土壌情報の取得、節 2.5 で現象のシミュレーションについて述べる。なお、本手法のシミュレーションでは、ポリゴンに張り付けるテクスチャの 1 ピクセル単位での処理を行うものとする。

### 2.1 透水性

透水とは水が地面を通る現象のことであり、土質力学・土壌物理学の分野で研究されている。路面に降った雨水を地中へ還元する機能やダム安全性などに関わるため、専門的な研究・実験が行われている。Henry Darcy[21] は土・地盤中を流れる水の速度の法則 (Darcy's Law) を見出した。土の中を通過する単位時間当たりの水量を  $Q$ 、土の断面積を  $A$  としたときの土・地盤中の流速  $v$  は式 (2.1) となる。

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

また、ここでの流速  $v$  は透水係数  $k$  と動水勾配  $i$  を用いて次の式 (2.2) で表すことができる。

$$v = ki \quad (2.2)$$

透水係数  $k$  は土の種類によって異なる固有の物理量である。動水勾配  $i$  は水頭差  $\Delta h$  と距離  $L$  を用いると式 (2.3) で表すことができる。

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.3)$$

水頭は水の高さで圧力を表したものである。水頭差は2つの水頭の差であり、水は水頭の低い方へと流れる。図 2.1 は水頭差の図である。

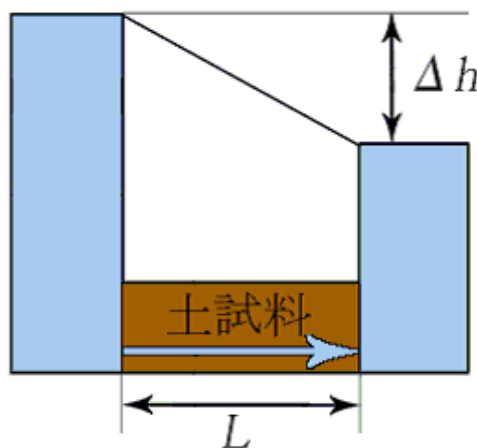


図 2.1: 水頭差による圧力

## 2.2 飽和度

土壌中には土粒子の間隙があり、連続した間隙部分が水の通り道となる。また、土粒子が小さいほど間隙は狭くなるため水は流れにくくなり、土壌中を水が流れる速度も低下する。このため、土粒子の大きさと浸透する速度は関係があるといえる。図 2.2 は土壌における間隙の図である。

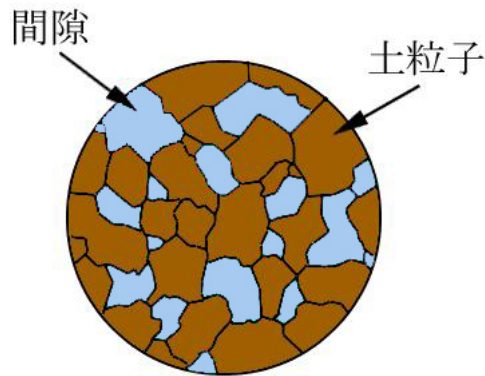


図 2.2: 土壌における間隙

飽和度とは土壌の間隙の中で水が占めている割合である [22]。土壌中の間隙の体積を  $V_v$ 、水分の体積を  $V_w$  としたときの飽和度  $S_r$  は式 (2.4) で表すことができる。また、 $S_r = 100$  のとき土は飽和しているという。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (2.4)$$

土が飽和することは全ての間隙を水が満たしているということである。飽和状態の土には過剰な水分が浸透しなくなる。

## 2.3 流体情報の取得

含水部分の位置と含水量の2つの要素を取得する。含水位置は、地形上に水分が存在する場合の位置を指す。つまり、地形表面上の含水部分か新たに水分を吸収した部分となる。含水量は含水位置に対する水分量を指す。取得した含水位置と含水量のデータは、ハイトフィールド [23] を用いて管理する。図 2.3 はハイトフィールドの図である。ハイトフィールドでは平面を2次元格子で構成し、各格子点がそれぞれ高さの値を持つものである。各格子点は平面の縦横それぞれの位置情報を持つため、2つの値を用いて位置を表すことができる。本手法では  $n$  と  $m$  で縦横を表し、各格子点の位置  $(n, m)$  を含水位置、含水位置  $(n, m)$  における含水量を  $h(n, m)$  で表す。

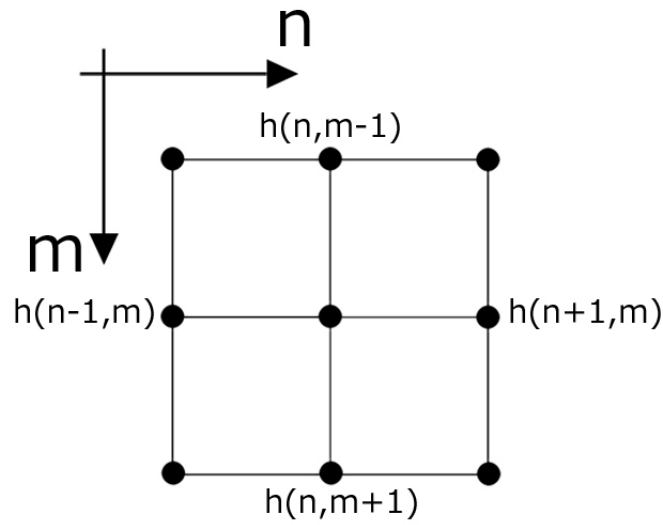


図 2.3: ハイトフィールド

本手法ではハイトフィールドをテクスチャデータとして扱うことで大量のデータを管理する。

## 2.4 土壌情報の取得

本論文での土壌情報とは、地形を表すポリゴンの持つ傾きの方向と強さを指す。土壌情報は、重力による浸透方向と強さを算出するために取得する。ポリゴンの持つ傾きの方向と強さは、ポリゴン単位で取得し、以降の同ポリゴン上で行う処理で用いる。傾きに関する情報はポリゴンの法線ベクトル  $\mathbf{P}_{nor}$  とアップベクトル  $\mathbf{P}_{up}$  を用いて数値化する。図 2.4 はポリゴンの傾き方向と強さを表す図である。

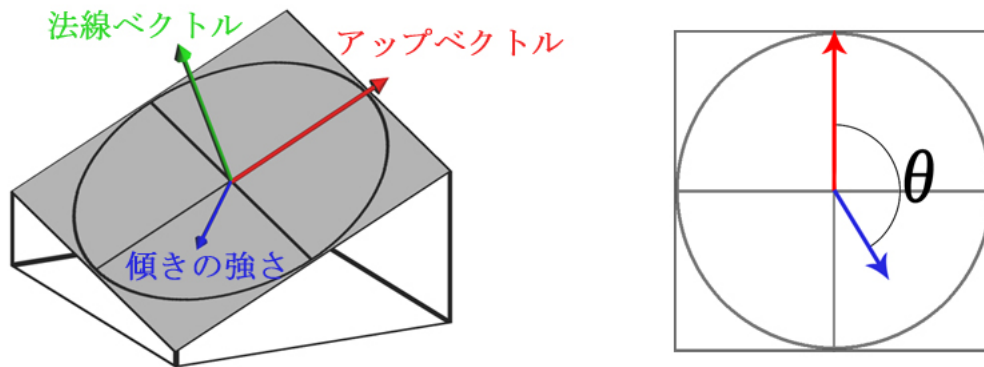


図 2.4: ポリゴンの傾き方向と強さ

ポリゴンの傾き方向と強さの数値を算出する方法を述べる。重力方向を表すには、ベクトルを用いて  $\mathbf{G}_{nor} = (0, -1, 0)$  とする。ポリゴンの傾き方向と強さを表すベクトル  $\mathbf{G}_{perp}$  は、重力方向ベクトル  $\mathbf{G}_{nor}$  のポリゴン法線ベクトル  $\mathbf{P}_{nor}$  に対する射影の垂直成分ベクトルを取得する。このベクトル  $\mathbf{G}_{perp}$  とポリゴンのアップベクトルである  $\mathbf{P}_{up}$  の成す角  $\theta$  は、重力による浸透の勾配値を求める際に必要となる。2つのベクトル  $\mathbf{A}$  と  $\mathbf{B}$  の成す角  $\theta$  は内積の公式より式 (2.5) となる。本論文では、内積は「 $\cdot$ 」を用いて表す。

$$\theta = \arccos \left( \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| |\mathbf{B}|} \right) \quad (2.5)$$

このため、ベクトル  $\mathbf{G}_{perp}$  とアップベクトル  $\mathbf{P}_{up}$  の成す角  $\theta$  は式 (2.6) となる。

$$\theta = \arccos \left( \frac{\mathbf{G}_{perp} \cdot \mathbf{P}_{up}}{|\mathbf{G}_{perp}| |\mathbf{P}_{up}|} \right) \quad (2.6)$$

ここで求まる角度  $\theta$  は  $0 \sim \pi$  の値をとる。これを内積と外積を用いて  $0 \sim 2\pi$  の範囲に修正する。最後に、ベクトル  $\mathbf{G}_{perp}$  とベクトル  $\mathbf{P}_{up}$  を用いて成す角  $\theta$  を求め、シミュレーションで使う勾配値を計算する。本手法では近傍セルの値を用いてシミュレーションを行うため、近傍の 8 セルに対応するの重力勾配値を設定する。ポリゴンが水平の場合、近傍セルそれぞれの重力勾配値は 1.0 となる。ポリゴンが傾いている場合は、相対する近傍セル同士の合計値が 2.0 となるようにする。例えば、



一方が0.8の場合、相対するもう片方は1.2となる。これは質量保存の法則を成立させるためである。ベクトル  $\mathbf{G}_{perp}$  を  $i$  と  $j$  の方向に成分を分解し、それぞれの成分ごとに計算することで斜めのセルにも重力勾配値を設定できる。図2.5は近傍セルに重力勾配値を設定した図である。

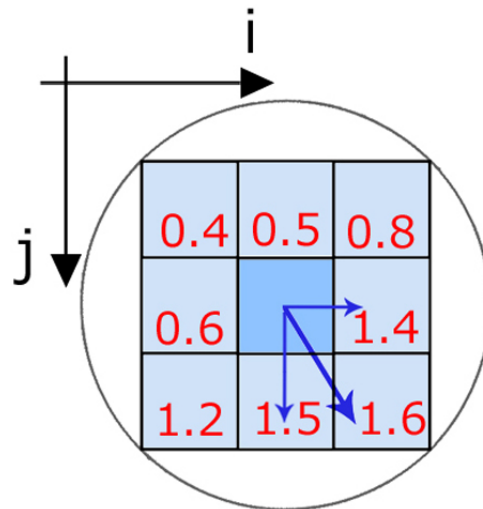


図 2.5: 近傍セルの重力勾配値

## 2.5 現象のシミュレーション

水の浸透をシミュレートするために、本手法ではテクスチャのピクセル単位での処理を行う。各ピクセル間の距離は一定であるため、式(2.3)での距離  $L$  の値は同一ポリゴン上では常に一定となる。そのため、本手法では各セルの含水量による水頭差を、直接、動水勾配として考える。隣接するセルからの流入は、近傍8セルの動水勾配の平均値を半分にした値となる。式(2.7)は、水平時における隣接するセルと水頭差  $\Delta h$  による流入量  $R$  を求める式である。ここでの透水差は  $\Delta h(i, j, k, l)$  で表し、 $\Delta h(i, j, k, l)$  は  $h(k, l) - h(i, j)$  とする。ポリゴンが水平でない場合は、前

節で求めた重力勾配値を対応するセルに反映した値に修正する。

$$R(i, j) = \frac{1}{2} \sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{j+1} \Delta h(i, j, k, l)$$

ただし  $\Delta h(i, j, i, j) = 0$  とする

(2.7)

ある1セルの  $\Delta t$  後の含水量  $h'(i, j)$  は、現在の含水量  $h(i, j)$  に流入量  $R(i, j)$  を加えた値となる。図 2.6 は、隣接する1つのセルからの流入による含水量の変化を説明する図である。また式 (2.8) は、流入量  $R(i, j)$  と現在の含水量  $h(i, j)$  による  $\Delta t$  後の含水量  $h'(i, j)$  を求める式である。

$$h'(i, j) = h(i, j) + R(i, j)$$
(2.8)

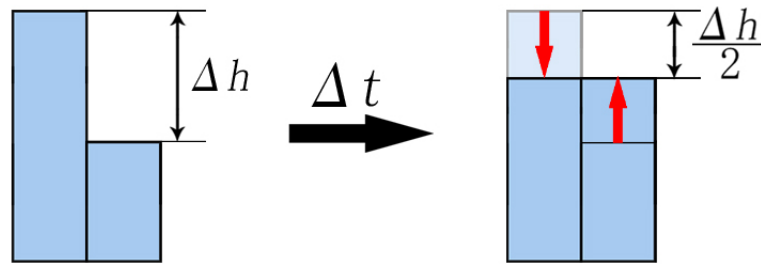


図 2.6: 流れによる含水量の変化

前述の式では、表面下へ浸潤する水分量の変化を考慮していない。そこで、本手法では内部浸透率  $c$  を定めることで表面下への浸潤を表現した。内部浸透率は初期値で 1.0 とし、時間経過に伴い一定数減少する。内部浸透率を含水量に乘算することで、含水量に応じた減少量を求めることが出来る。つまり、含水量の多い部分ほど、多くの水量が表面下へ浸潤する表現が可能となる。式 (2.9) は、式 (2.8) で求めた含水量  $h'(i, j)$  と内部浸透率  $c$  による表面下への浸潤を考慮した含水量  $H(i, j)$  を求める式である。

$$H(i, j) = c \cdot h'(i, j)$$
(2.9)

次に飽和について述べる。土壌の飽和は、土壌の間隙が水で満たされることで起こる現象である。本手法では、テクスチャのある1ピクセルのRGB値をそれぞれ  $r, g, b$  としたとき、以下の式 (2.10) で初期飽和値  $a$  を求める。

$$a = \frac{r + g + b}{3}$$
$$\text{ただし} \begin{cases} 0 \leq r \leq 255 \\ 0 \leq g \leq 255 \\ 0 \leq b \leq 255 \end{cases} \quad (2.10)$$

物理的な土質による再現ではないが、これにより飽和部分に複雑性を持たせることが可能となる。飽和値が一定以上になった部分では、以降の流入が起きないものとして処理の対象から除外する。このため、一度飽和状態になった部分は蒸発が起きない限り飽和状態を維持する。

最後に水分の蒸発について述べる。水分蒸発は、土壌の状態だけでなく気温や湿度などの気候要素も関わり、実際は微細な含水量の変化が長時間かけて起きる現象である。本研究では土壌以外の環境要素は考慮していないため、含水量を減衰することで水分蒸発の疑似的な表現を試みた。

# 第 3 章

## 検証と考察

### 3.1 実装環境

この章では、第 2 章で述べた手順でのシミュレーション手法の例を示す。3DCG による描画には FKSystem[24] を用いて実装を行った。実行したマシンの動作環境を次に示す。

表 3.1: 実行環境

OS	Windows 7 Enterprise
CPU	AMD Phenom(tm) II X6 1090T Processor 3.20 GHz
GPU	NVIDIA GeForce GTX 470
メモリ	4.00 GB

### 3.2 シミュレーション結果を適応

描画用テクスチャに、シミュレーション結果を適応する。図 3.1 は無地の面にシミュレーション結果を適応させた画像である。図 3.1 では計算結果を単色で表現し、飽和状態の部分は白く表示している。

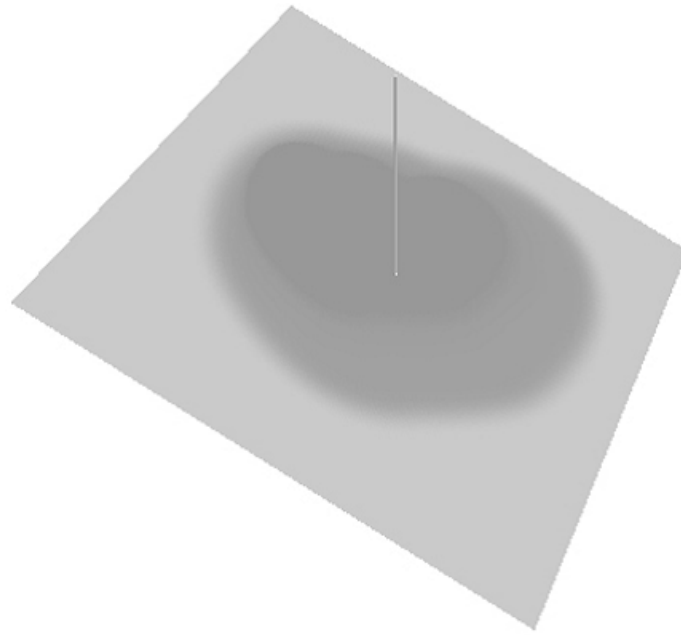


図 3.1: シミュレーション画像

本手法では、累積の含水量や飽和水量を元に、乾燥～飽和を以下の 7 段階に分けている。段階を分けた画像の描画時はそれぞれ対応した色で単色の表現をする。図 3.2 は図 3.1 と同じ数値を段階に分けて描画することで、含水量の変化を視覚的に表現したものである。

図 3.3 はシミュレーション結果に地形データを反映した図である。図 3.4 は図 3.3 を含水量による段階分けをして描画した図である。

表 3.2: 質感の段階分け

土の状態	飽和度
乾いた	0
少し湿った	1 ~ 25
湿った	26 ~ 50
非常に湿った	51 ~ 75
ぬれた	76 ~ 99
飽和した	100

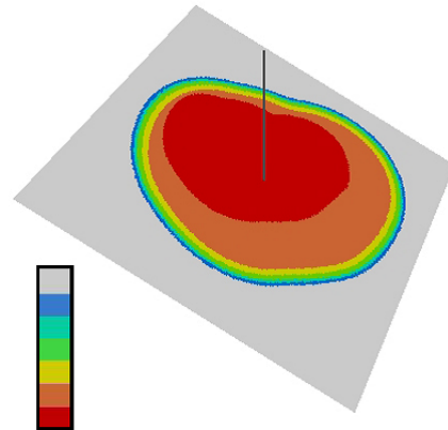


図 3.2: 含水量による段階分け



図 3.3: レンダリング

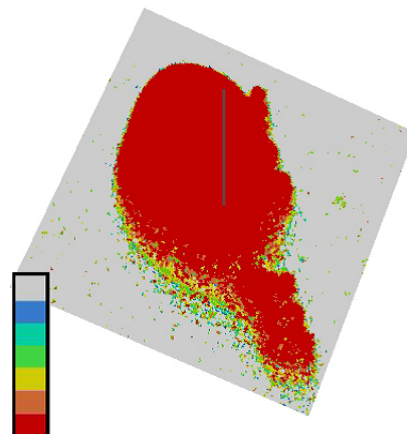


図 3.4: 段階分けレンダリング

図 3.5 と図 3.6 は本シミュレーションを用いて生成した画像を時間経過順に並べた図である。図 3.5 はシミュレーション結果をそのまま反映しているため、飽和部分までの含水量の変化がグラデーションにより表現できている。図 3.6 はシミュレーション結果を飽和までの 7 段階に分けて描画している。このことから、時間  $t$  の経過によって、水分の透水現象が再現できていることが分かる。また、面の傾きを考慮して重力の方向へ浸透していることも確認できる。

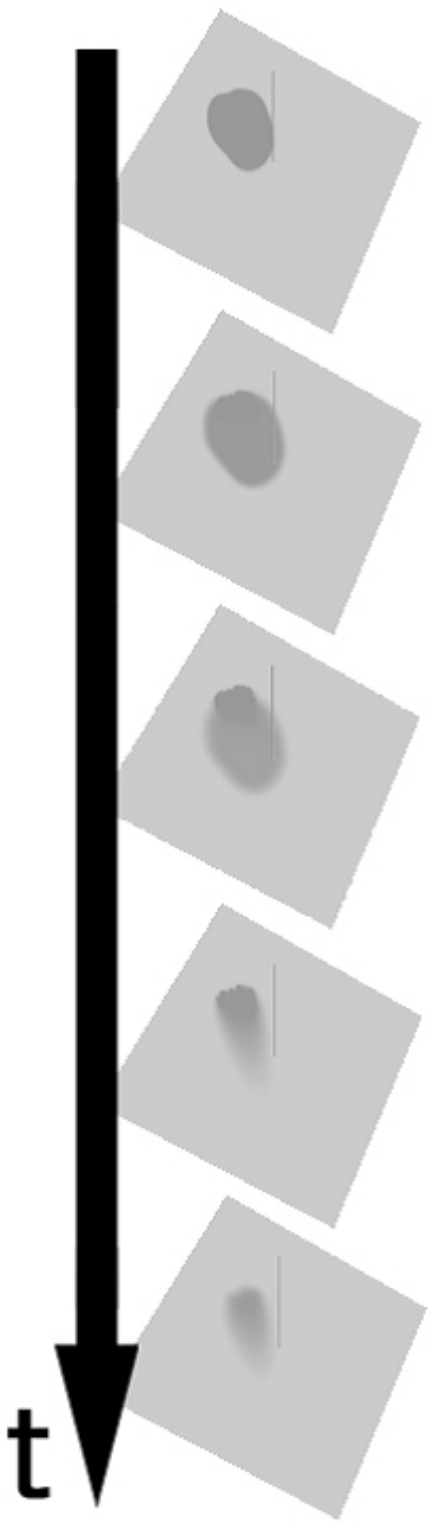


図 3.5: シミュレーション結果

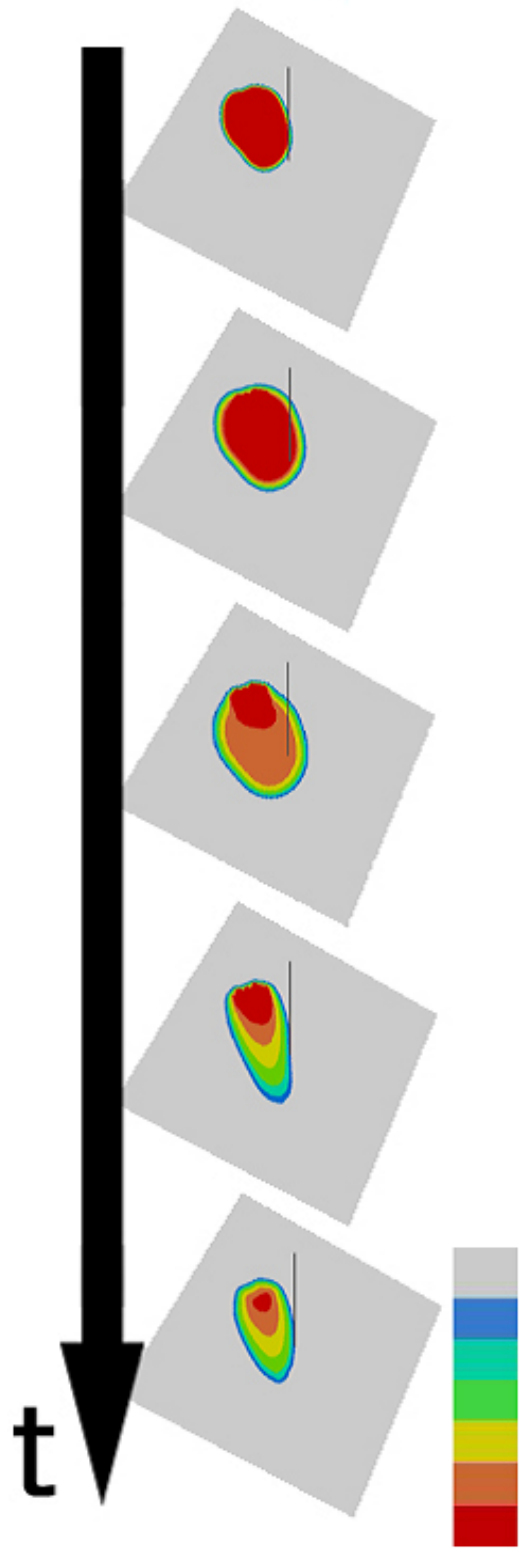


図 3.6: 段階分けシミュレーション結果

図3.7はシミュレーション結果に地形テクスチャの値を適応した画像である。適応後は含水状態の部分が複雑性を増していることが確認できる。

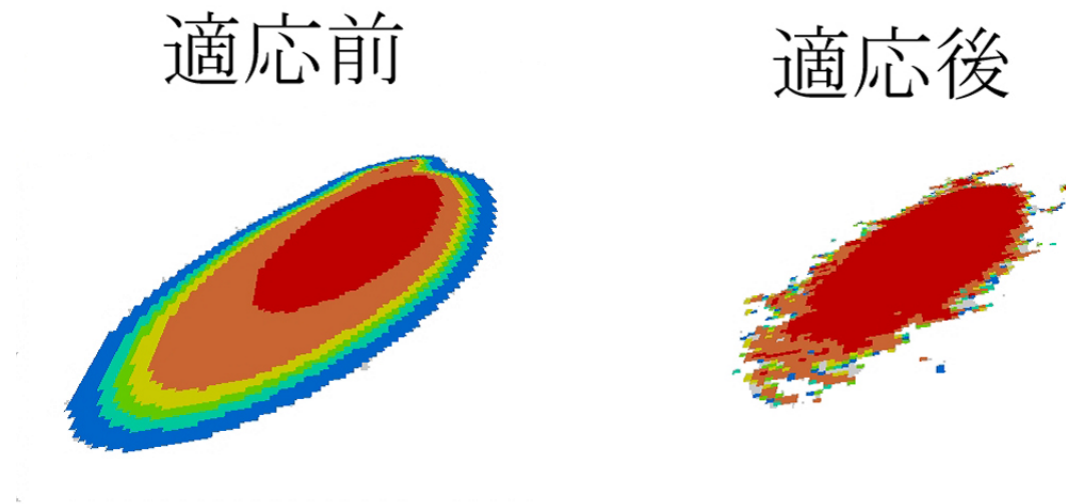


図 3.7: 地形データの適応結果

### 3.3 考察

本研究における浸透シミュレーションでは、透水性と飽和度、重力による浸透方向の違いを考慮した結果を得ることができた。水面と土壌の境界が強調されてしまう問題に対し、本手法では土壌の質感を序所に変化させることで改善を図った。また、地形テクスチャの値を用いることで状態の境界を複雑にし、実際の現象での地形形状による境界線生成の特徴を再現できた。本手法で必要となる流体の入力値は、流入位置と流入量の2つのみであるため汎用性の高いものといえる。



## 第 4 章

### まとめと展望

本研究では土壌物理学の分野を参考に、実際の流体現象である浸透現象の様子を 3DCG で表現することができた。重力や飽和を考慮することで、より現実に近い表現をすることができた。しかし、本手法では表面上での表現処理しか行っていない。例えば、植木鉢に水をまいて下から染み出てくるといった表現は、土壌内部の処理が必要になるため再現できない。また、テクスチャのピクセル単位での処理を行うため、テクスチャを適応したポリゴンの形状に依存してしまふ。

今後ハードウェア性能が進歩し、リアルタイム CG コンテンツにおいてもシミュレーション要素の高い手法が用いられるようになれば、本手法で考慮した要素だけでは表現の幅が足りなくなる可能性がある。本手法の延長線にあたるものとして、含水量の変化に伴う土の流動特性への発展が一例として挙げられる。また、本研究で得たデータを用いることで、水面周囲の地形側の質感変化を滑らかに表現することが可能となる。シェーダーを用いて、地表の質感から水面の質感に段階的に変化することで、これまでの境界線付近における違和感の改善が期待できる。本研究では動作速度の検証は行っていないが、GPGPU による高速処理が可能となれば、大量の水が存在する状況にも対応しやすくなると考えられる。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、いつも厳しくも優しいご指導を頂いた、本校メディア学部渡辺大地先生と三上浩司先生に感謝致します。また、本論文の制作にあたり、最後まで校正にお付き合い下さった阿部雅樹氏に感謝致します。そして、研究の技術的な知識や助言を頂いた同研究室の皆様にも感謝致します。渡辺先生には、研究だけでなく部活動においても、困った時にはいつも多くの事を教えて頂きました。ありがとうございました。

いつも楽しい時間を共に過ごし、多くの刺激と笑いを提供してもらった TUT-Winds の仲間にも感謝します。ありがとう。

最後に、生活面や金銭面で多くの支援をもらい、今まで暖かく見守って下さった両親に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] andDoug James Jeffrey Chadwick. Animating fire with sound. *SIGGRAPH2011*, 2011.
- [2] Duc Quang Nguyen, Ronald Fedkiw, and Henrik Wann Jensen. Physics-based modeling and animation of fire. *SIGGRAPH2002*, 2006.
- [3] 山田 航. 弾性バネモデルを用いた布シミュレーションにおける水濡れによる粘着性の表現に関する研究. 2011.
- [4] Pixar animation studios. <http://www.pixar.com/>.
- [5] Battlefield3. <http://www.battlefield.com/jp/battlefield3>.
- [6] Crysis2. <http://crisis.jp/crisis2/>.
- [7] Nick Foster and Ronald Fedkiw. Practical animation of liquids. *SIGGRAPH2001*, 2001.
- [8] Douglas Enright, Stephen Marschner, and Ronald Fedkiw. Animation and rendering of complex water surfaces. *SIGGRAPH2002*, 2002.
- [9] Jos Stam. Stable fluids. *SIGGRAPH1999*, 1999.

- [10] Geoffrey Irving, Eran Guendelman, Frank Losasso, and Ronald Fedkiw. Efficient simulation of large bodies of water by coupling two and three dimensional techniques. *SIGGRAPH2006*, 2006.
- [11] Nuttapon Chentanez and Matthias Mueller. Real-time eulerian water simulation using a restricted tall cell grid. *SIGGRAPH2011*, 2011.
- [12] 西川 善司. 3d グラフィックス・マニアックス 水面の表現 (1)～水面表現の歴史. <http://news.mynavi.jp/column/graphics/052/index.html>.
- [13] James Frederick Blinn. Simulation of wrinkled surfaces. *SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 12(3), , 1978.
- [14] Krishnamurthy and Levoy. Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes. *SIGGRAPH1996*, 1996.
- [15] 徳山 哲朗, 山本 強, 高井 昌彰. 水面下の光の模様的高速レンダリング手法. 情報処理学会研究報告, Vol. CG-92, pp. 13–18, 1998.
- [16] 坂本 英男, 水上 嘉樹, 多田村 克己. Cg による路面状況を考慮した水しぶきの表現手法の開発. 情報処理学会研究報告グラフィックスと CAD (CG) , Vol. 119, pp. 95–100, 2006.
- [17] Maverick project. <http://maverickproj.web.fc2.com/pg67.html>.
- [18] 長谷川 周一, 前田 隆, 佐々木 清一. 土の水平浸潤および不飽和透水係数に関する研究. 北海道大学農学部法文紀要, Vol. 10(3), pp. 183–205, 1977.
- [19] Witawat Rungjiratananon, Zoltan Szego, Yoshihiro Kanamori, and Tomoyuki Nishita. Real-time animation of sand-water interaction. *Pacific Graphics*, Vol. 2008-27, .

- [20] 遠藤 結城, 金森 由博, 三谷 純 and 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. *Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジ  
ウム 2010*, Vol. 2010-6, .
- [21] Henry Darcy. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, pp. 590–594, 1856.
- [22] 足立格一郎. 土質力学. 共立出版, 2002.
- [23] Elmar Langetepe and Gabriel Zachmann. 空間的データ構造とアルゴリズム.  
ボーンデジタル.
- [24] 渡辺 大地. Fine Kernel Tool Kit System.  
<http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.