

2009年度 卒業論文

侵食シミュレーションによる
土柱地形の自動生成に関する研究

指導教員：渡辺 大地 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 M0106143

河崎 研司

2009年度 卒業論文概要

論文題目

侵食シミュレーションによる
土柱地形の自動生成に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0106143

氏名

河崎 研司

**指導
教員**

渡辺 大地 講師

キーワード

3DCG、侵食シミュレーション、ボクセルデータ、
ポイントベースレンダリング、地形景観

近年3DCG技術の発展は目覚ましく、様々な自然景観を3DCGで表現することが可能になった。自然景観の中の1つに侵食によって形成した侵食地形という物があり、その地形を生成する1つの方法として、侵食シミュレーションを行い地形を生成する方法がある。しかし既存の侵食シミュレーションは地層の差から発生する侵食量の差異を考慮していないため、地層の差が地形景観に重要な影響を及ぼす侵食地形を生成することはできない。本研究では地層の差から起こる侵食量の差異が発生している、土柱地形を侵食シミュレーションによって生成した。

本研究では実際に存在する土柱地形を分析し、形成過程を調査し、土柱地形の生成を行った。地形のレンダリングには、空間を3次元格子点状に分割した領域に値を設定するボクセルデータを利用し、ポイントベースレンダリング手法を用いて地形の生成を行った。侵食する前の初期地形に粒子堆積法と呼ぶ手法を使用して地形の生成を行い、土柱地形を形成する3つの主要な要因である、水による侵食、氷による侵食、酸性雨による侵食の3つのシミュレーションを行った。地形表面の高さから土柱の基礎部分となる地層を設定し、水による侵食で土柱地形の基礎部分を形成し、氷による侵食で土柱を独立した柱とし、酸性雨による侵食で土柱表面に発生する侵食量の差異を実現した。生成した土柱地形の再現度を検証した結果、土柱地形の特徴を考慮した地形景観を生成することができた。

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	3
第2章	土柱地形とは	4
2.1	土柱の特徴について	4
2.2	アメリカに存在する土柱の形成過程	6
2.2.1	基礎部分の形成	6
2.2.2	氷による侵食	6
2.2.3	酸性雨による侵食	6
第3章	侵食シミュレーションによる土柱地形の生成	8
3.1	土柱地形の表現	8
3.1.1	形状表現のためのデータ構造	8
3.1.2	レンダリング手法	9
3.2	侵食シミュレーション	9
3.2.1	初期地形の生成	9
3.2.2	土柱領域の設定	11
3.2.3	雨による侵食シミュレーション	12
3.2.4	氷による侵食シミュレーション	15
3.2.5	酸性雨による侵食シミュレーション	17
3.2.6	土柱の除去	20
第4章	結果と考察	22
4.1	結果	22
4.2	考察	24
第5章	まとめ	25
	謝辞	26
	参考文献	27

目 次

2.1	ブライスカニオンの土柱地形	5
2.2	極端な土柱の例	5
3.1	生成した初期地形	10
3.2	ハイトフィールド	11
3.3	土柱領域に分けた地形の断面図	12
3.4	雨による侵食シミュレーション	14
3.5	生成した4角柱	14
3.6	硬度値の再設定	16
3.7	生成した柱群	16
3.8	侵食に弱い地層の位置	17
3.9	侵食に強い層における硬度値の修正	20
3.10	上部の除去が発生する土柱	21
3.11	除去後の土柱	21
4.1	生成した土柱地形	23
4.2	極端な細さを持った土柱	23

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

近年、コンピューターグラフィックス（以下 CG）技術の向上によって、様々な自然景観を表現することが可能になった [1]。自然景観を CG によって再現した研究として、水辺における苔のビジュアルシミュレーションを行った小笠原 [2] の研究、特殊な地形の 1 つであるテーブルマウンテンを CG によって生成した Benes [3] の研究や溶岩が冷えて固まり規則正しく割れ目が出来た岩場地形である、柱状節理と呼ぶ地形を生成した伊東 [4] の研究など様々な物がある。自然景観の中でも地形景観を CG によって作成する研究は、CG の研究の中でも非常に初期の頃から研究が盛んである。地形景観は、フライトシミュレーターやドライビングシミュレーターでの応用など用途は多岐に渡っている。しかし地形景観の中でも、山岳地形を手動で作成するのは非常に手間がかかるため、地形を自動的に生成する手法が存在している。その中でも代表的な物に自己相似性を持っている図形である、フラクタルという現象を利用したフラクタル地形 [5][6] がある。フラクタル地形を生成する方法の 1 つ、中点変位法 [7] と呼ぶ手法では地形を手動で作成するのに比べ、線分を繰り返し分割するという処理で、簡単に地形を生成することができる。しかし、中点変位法は簡単に地形を自動生成することができるが、生成した地形は物理現象の 1 つである侵食を一切考慮していないことが多い。現実存在している多くの地形は侵食の影響を受けており、フラクタルで生成した地形には違和

感が生じる。そのため、侵食現象が起こっている地形を生成するための1つの方法として、地形に侵食シミュレーションを適用する方法がある。侵食シミュレーションには、水の動きを正確に求めることでリアルな侵食地形を生成したPeter[8]の研究や温度変化による侵食シミュレーションを行い生成したKenton[9]の研究などがある。侵食シミュレーションには地質について侵食量の差異を考慮することはあるが、地層による侵食量の差を考慮した侵食シミュレーションの研究は存在しないという問題点がある。そのため地層によって侵食量の差異が大きく存在する特殊な侵食地形を生成することができない。地層とは水や噴火などによって運搬された堆積物が長い間降り積もり、層状となった物である。地層には堆積の要因や堆積物の成分が変わることにより、地層の性質が変わることがある。地層の性質が変わると侵食現象に対する抵抗力に地層ごとで差が発生し、侵食の進みが早い地層と遅い地層に分かれる現象が発生する。なお本研究では、侵食の進みが早い層を以後「侵食に弱い地層」、侵食の進みが遅い層を以後「侵食に強い地層」と呼称する。

本研究では地層による侵食量の差が、地形の景観に大きな影響を与えている地形の1つである土柱地形に着目した。土柱地形は地層と気候の条件がそろった時にできる、特殊な地形の1種である。土柱地形は土柱を構成する地層の中で、地層の性質が明確に分かれているため、土柱の表面における侵食量に大きな差が出現する。そのため、土柱地形を侵食シミュレーションで生成しようと考えた場合、地層による侵食量を考慮した侵食シミュレーションを適用しなくてはならない。本研究では土柱の特徴を分析し、地層ごとの特性を考慮した侵食シミュレーションを行い土柱地形を自動で生成することを目的とする。世界各地に土柱地形と呼ばれる地形は何種類か存在するが、本研究では地層の性質差によって土柱の表面で侵食量が大きく変わっているアメリカのブライスカニオン国立公園に存在する土柱を研究対象とし、侵食シミュレーションによって生成することを目指した。侵食シミュレーションには土柱の基礎地形を生成する雨による侵食、独立した土柱を生成する氷による侵食、土柱表面の地層に応じて侵食量が変わる現象を表現す

る酸性雨による侵食の3つに分けた侵食を行い、土柱地形を再現した。

1.2 本論文の構成

本論文は全5章で構成する。2章では実際の土柱地形の生成過程を述べる。3章では本研究で実装した侵食シミュレーションを述べる。4章で本研究で表現した土柱地形の考察をする。5章で本研究を総括する。

第 2 章

土柱地形とは

本章ではアメリカに存在する土柱地形の生成過程について詳しく述べる。

2.1 土柱の特徴について

土柱地形とは地層が明確に分かれた特殊な地形に、気候の条件が重なった時出現する地形である。土柱地形とは侵食現象によって、柱状となって存在している地形である。土柱地形の基本的な形成過程は侵食に弱い場所と、侵食に強い場所が混在する地形において、急速に風雨による侵食が起こると発生する地形である。アメリカのブライスカニオン国立公園にある土柱の表面には侵食が進んでいる層と進んでいない層に分かれているのが確認できる。これは地層によって侵食量に差があることから発生した現象である。図 2.1 にアメリカのブライスカニオン国立公園に存在する土柱を示す。



図 2.1: ブライスキャニオンの土柱地形

アメリカに存在する土柱が持つ特徴として、極端に他の土柱より高い土柱が存在し、大きくコの字型に侵食が進んでいる土柱が存在していることである。図 2.2 にコの字型に侵食が進んだ特徴を持つ土柱を示す。この様な土柱は地層の中に、侵食に極端に強いドロマイトと呼ぶ成分が多く含んでおり、侵食が進むのが遅く、他の土柱より高いまま残っている [10]。

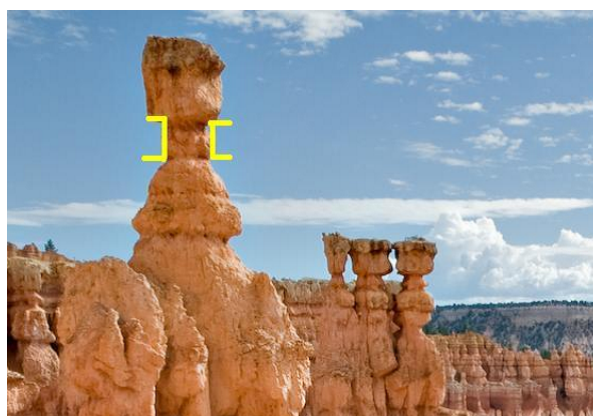


図 2.2: 極端な土柱の例

2.2 アメリカに存在する土柱の形成過程

アメリカに存在する土柱は、低い山岳地形に雨や川による侵食が長い間起こり、4角柱に近い形の土柱の基礎部分の様な物ができる [11]。その後基礎部分に氷と酸性雨の侵食が起こることで基礎部分になっていく。以下に具体的な侵食現象について述べる。

2.2.1 基礎部分の形成

地形内部は上部に存在する地層から圧縮され、密度が高くなり固い地層となる [12]。基礎部分は地形内部の固い地層で構成されており、水による侵食が進むのが遅く崩れにくく、柱状の形に残り土柱の基礎部分となっていく。

2.2.2 氷による侵食

氷による侵食が進むことで基礎部分に隙間ができ、独立した柱となる。氷による侵食は以下のように進んでいく。

1. 冬になると雪が降り、土柱の基礎部分に積もる。
2. 昼間になると気温が上がり雪が溶け出し、土柱の基礎部分に水が染み込む。
3. 染み込んだ水が夜になると再び凍る。水が氷になる時に体積膨張を起こすことで中から押し広げられて基礎部分が崩れていき、独立した柱となっていく。

上記のような順番で氷による侵食が起こり、独立した柱となる。

2.2.3 酸性雨による侵食

アメリカの土柱が存在する地域に降る雨は微量だが酸性の成分を含んでいる酸性雨である。酸性雨は石灰岩と化学反応を起こすため、地層の中に石灰岩が多く含まれていると早く侵食が進んでいき、ほかの地層と侵食量の差ができる。侵食

量が少ない地層は、石灰岩のほかにシルト岩や泥岩の割合が高く存在しており、酸性雨との化学反応が少なく、侵食が進むのが遅い部分となる。このような順番で侵食が進み、土柱独自の形となっていく。

第 3 章

侵食シミュレーションによる土柱地形の生成

本章では、3.1 節で土柱地形の表現に必要なデータ構造とレンダリング手法について述べる。3.2 節で侵食シミュレーションの概要について述べる。

3.1 土柱地形の表現

3.1.1 形状表現のためのデータ構造

本研究における土柱地形生成の侵食シミュレーションのデータ構造にはボクセルデータ [13] と呼ぶデータ構造を使用した。ボクセルとは、3次元空間を等間隔に並んだ格子点状に分割した領域で、ボクセルが持つデータをボクセルデータと呼ぶ。ボクセルデータは3次元格子点状でデータを定義しているので記憶容量を多く消費するが、正確に物体を表現することが可能である。本研究では空間を3次元格子点状に分割した領域内の各ボクセルに硬度値と呼ぶ値を設定する。

表 3.1 は本研究における硬度値 a の定義である。硬度値は侵食に対する抵抗力を表す値である。0.0 を地表となっていない領域と地表内部となっていない領域、2.0 を侵食現象が発生しない領域とし、 $0.0 < a < 2.0$ の区間に硬度値がある場合は、硬度値が高いほどその領域は侵食に強く、硬度値が低い領域ほど侵食に弱い領域

として地層の強さを表現した。本研究では、3種類の侵食シミュレーションごとに硬度値を設定し、侵食シミュレーションを行う。

表 3.1: 硬度値の定義

硬度値 a	硬度値の定義
0.0	地形を構成していないボクセル
$0.0 < a < 2.0$	侵食現象が起こるボクセル
2.0	侵食現象が発生しないボクセル

3.1.2 レンダリング手法

本研究では地形のレンダリングにポイントベースレンダリング [14][15] の手法を用いる。ポイントベースレンダリングとは物体を多くの点の集合とみなし、各点を描画していく手法である。本研究では地表となっている場所に点群を配置し描画を行っていく。侵食現象が起こるたびにボクセルの硬度値を更新し、更新に合わせて点群の再配置を行った。

3.2 侵食シミュレーション

3.2.1 初期地形の生成

本研究では侵食シミュレーションを行う前の初期地形を粒子堆積 [16][17][18] と呼ぶ手法で生成した。この手法は火山の噴出物によって降り積もった、火山性の山脈や列島などをシミュレートすることが可能である。本研究では y 軸が高さとなる xz 平面の空間に地形の生成を行った。粒子堆積手法によって生成した地形の空間を、3次元格子点状に分割し、硬度値を設定する。本研究では x 軸上に空間を分割した数と z 軸上に分割した数を等しくして α で表す。 y 軸上に分割した数は β とする。全ボクセルの数は $\alpha^2\beta$ となる。 x 軸上と z 軸上のボクセル数を等しくしているため x 軸上と z 軸上のボクセル間の距離を l で表し、 y 軸上のボクセル間の距離を b とする。地形表面内部のボクセルが持つ硬度値には 1.0、外部は 0.0 とし

て硬度値を2種類の値に設定した。硬度値の1.0と0.0の境になっているボクセルを地形の表面とし点群を配置した。本研究では1つ1つのボクセルを V_{ijk} と表し、ボクセルの中心点の位置ベクトルを $\mathbf{V}_{ijk}(li, bj, lk)$ とした。図3.1は粒子堆積手法によって、生成した初期地形である。

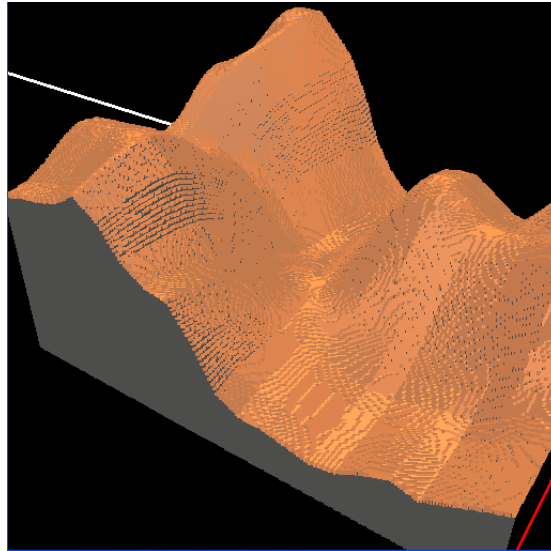


図 3.1: 生成した初期地形

初期地形を生成した後、本研究では侵食シミュレーションにおいて、地形表面のボクセル位置の高さが必要であるためハイトフィールド [19] を作成した。図3.2はハイトフィールドの図である。2次元格子点上に地形表面の高さの値を持ち $h(i, k)$ の様に高さの値を表記する。

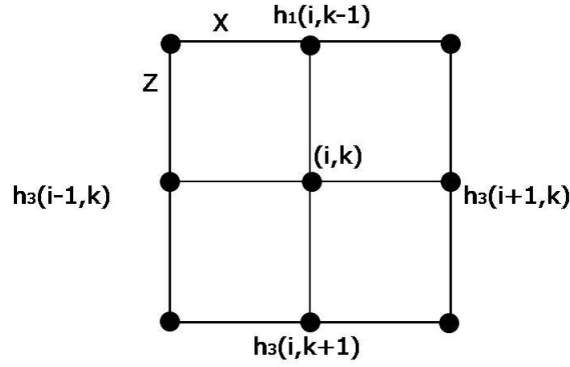


図 3.2: ハイトフィールド

3.2.2 土柱領域の設定

土柱を生成するために基礎部分と似た形である、4角柱の範囲を決定する。本研究では4角柱の範囲を土柱領域と呼び、土柱領域内部に同じ底面で構成する基礎部分を持つ。土柱領域は正方形の底面をもち、1辺のボクセル数を整数のパラメータ s とした。 x 方向の土柱領域の番号を $n_x(0, 1, 2, \dots, \frac{\alpha}{s} - 1)$ とつけ、 z 方向は同じように $n_z(0, 1, 2, \dots, \frac{\alpha}{s} - 1)$ とつけた。 n_x と n_z の2種類の値で1つの土柱領域 $B(n_x, n_z)$ を決定する。式 (3.1) の範囲で土柱領域を構成する。

$$\{V_{ijk} \mid n_x s \leq i < (n_x + 1)s, n_z s \leq k < (n_z + 1)s\} \quad (3.1)$$

h_s は基礎部分の高さとし、式 (3.2) から求める。土柱領域の n_x と n_z を利用し、地形表面の高さ $h(i, k)$ の平均値を出し、パラメータ u 下げて求めた値を土柱領域内の基礎部分の高さとする。本研究では土柱領域 $B(n_x, n_z)$ 内の底面の位置から求まる地形表面の高さ $h(i, k)$ が全て u 以上の場合に限り、その土柱領域において土柱の生成を行う。

$$h_s = \left(\frac{1}{s^2} \sum_{i=n_x s}^{(n_x+1)s} \sum_{k=n_z s}^{(n_z+1)s} h(i, k) \right) - u \quad (3.2)$$

基礎部分を構成する全てのボクセル硬度値に2.0を設定し、侵食が起こらず残るようにした。図3.3は $s = 6$ の時の x 軸方向から見た、土柱領域に分けた地形の断面図である。

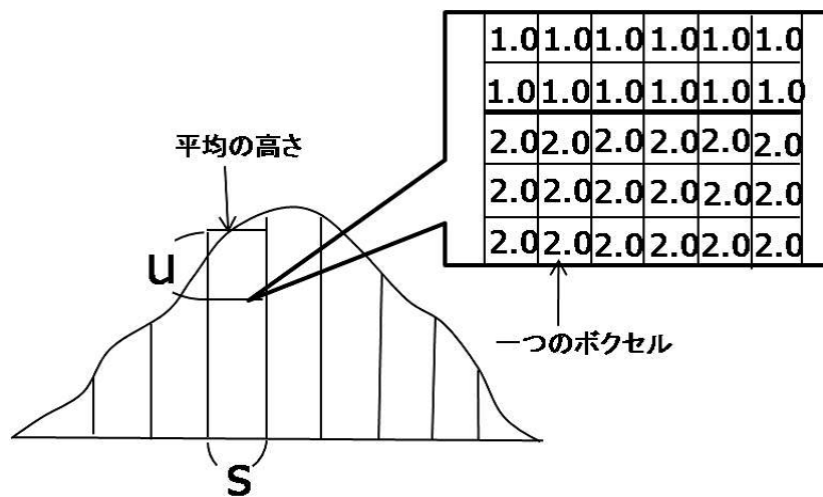


図 3.3: 土柱領域に分けた地形の断面図

土柱領域 $B(n_x, n_z)$ 内の平均をとった地形表面の中で高さが大きく違っている場合、式 (3.2) で求めた値 h_s が地形表面 $h(i, k)$ より高い場合が出てくる。そのような場合、その土柱領域で土柱の生成は行わなかった。

3.2.3 雨による侵食シミュレーション

粒子堆積手法によって生成した初期地形に雨による侵食シミュレーションを行う。雨による侵食で初期地形の硬度値が1.0となっている場所を削り、初期地形内部から基礎部分を生成する処理を行う。ハイトフィールドから勾配ベクトル [20] を

算出して雨に見立てた粒子の移動を行った。本研究ではハイトフィールドにおいて粒子が存在する格子点の位置から、ハイトフィールドの上下左右4点の高さ値を比べ勾配を求めた。式(3.3)は粒子が存在する格子点の位置を $h(i, k)$ 、上下左右4点の高さをそれぞれ $h_1(i, k - 1), h_3(i, k + 1), h_2(i - 1, k), h_4(i + 1, k)$ とし、勾配ベクトル \mathbf{g} を求める式である。

$$\mathbf{g} = \left(\frac{(h_2 - h_4)}{2}, \max(h_2 - h_4, h_1 - h_3), \frac{(h_1 - h_3)}{2} \right) \quad (3.3)$$

雨は格子点状に存在する様に雨の x 位置と z 位置を小数点第1位で四捨五入して、量子化を行い侵食シミュレーションを行った。雨による侵食シミュレーションは以下のような順番で行う。

1. 雨に見立てた粒子の位置 x と位置 z は一様分布乱数でランダムに設定し、高さを初期地形表面の中でハイトフィールドが持つ最も高い値の場所に発生させる。
2. 粒子が落下した場所のハイトフィールドにおける上下左右4点の格子点の高さ値から勾配となるベクトルを計算する。
3. 水粒子が地面に接触したら速度ベクトルに2.で算出したベクトルを代入し、水粒子を動かす。
4. 水粒子が通ったボクセルの硬度値が1.0の場合、侵食現象が起きたとし、硬度値を0.0にする。

図3.4は生成した地形に雨による侵食シミュレーションをおこなっている様子を示している。

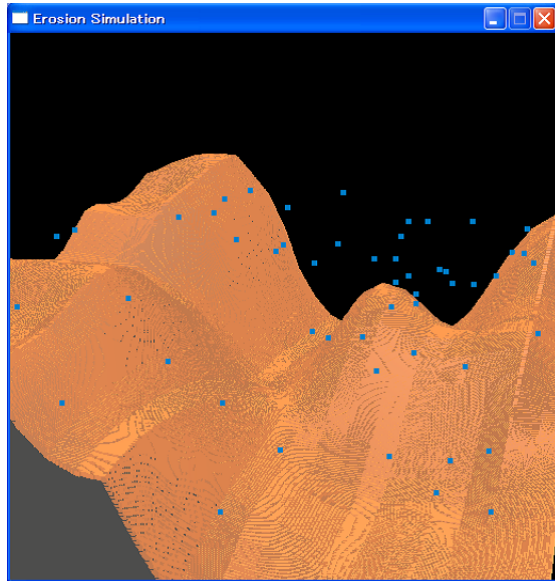


図 3.4: 雨による侵食シミュレーション

上記の方法で侵食シミュレーションをおこなっていくと、硬度値に 2.0 を設定した部分だけが侵食が発生せずに残り、1.0 の硬度値を持つボクセルが大幅に減るので、土柱領域内部の基礎部分を生成することができる。図 3.5 はシミュレーションによって生成した基礎部分である。

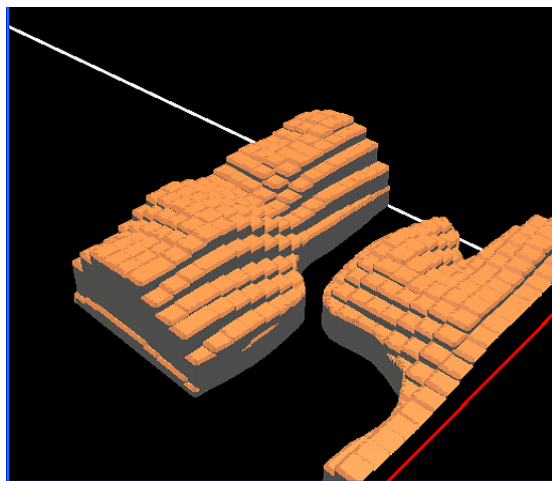


図 3.5: 生成した 4 角柱

3.2.4 氷による侵食シミュレーション

氷による侵食は基礎部分の中から押し広げる様にして侵食が進み、基礎部分同士に隙間ができていく。本研究では独立した土柱を生成するために、 y 軸に平行な芯を定義し、芯から離れていくほど侵食が早く進む様にし基礎部分同士に隙間ができる様にした。芯は土柱領域の底面を構成しているボクセルの1つから h_t の高さのボクセルまでを芯として定義する。芯として設定したボクセルの部分が侵食に最も強く、芯から離れるほど侵食に弱くなっていくように基礎部分を構成する全てのボクセルに硬度値を再設定した。式 (3.4) は硬度値の再設定に使用した式である。 a がボクセルの硬度値、 i と k が硬度値の再設定を行うボクセル位置、 i_c と k_c が芯となるボクセル位置で s が土柱領域底面における1辺のボクセル数である。

$$a = 2.0 - \frac{\max(|i - i_c|, |k - k_c|)}{s} \quad (3.4)$$

芯に設定したボクセルの硬度値に 2.0 を設定し、2.0 から xz 平面におけるチェス盤距離差 [21] の割合に応じて減算を行い求めた硬度値を、底面のボクセルから h_s までのボクセルに再設定した。図 3.6 は s を 10、芯の位置を $i = 5, k = 5$ の位置に設定し xz 平面の y 軸方向から見た硬度値の再設定の例を示している。

		X										
		1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5
		1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5
		1.6	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5	
		1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	
Z		1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	
		1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	
		1.6	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5	
		1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	
		1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	
		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	

図 3.6: 硬度値の再設定

氷の侵食シミュレーションでは $j = 0$ のボクセルを全て探索する。探索した場所の地形表面ボクセルの硬度値から実数のパラメータ q に設定した値を引いて、硬度値が 0 以下になった時点で、その部分の硬度値を 0.0 と固定する。このような設定をすることで、氷による侵食のシミュレーションを行った場合、芯から遠い場所は侵食が進みやすく、近い場所が残るので隙間ができ独立した土柱となる。図 3.7 はシミュレーションによって生成した土柱である。

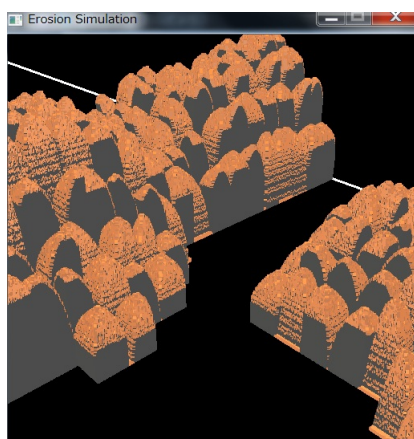


図 3.7: 生成した柱群

3.2.5 酸性雨による侵食シミュレーション

今までの処理で生成した土柱には地層に応じて侵食量が変わるという現象を考慮していないため、非常に直線的な部分を持つ土柱となっている。地層における侵食量が変わる現象を表現するために、土柱領域 $B(n_x, n_z)$ 内の硬度値が 0.0 を超える値のボクセルに酸性雨からの侵食に対する硬度値を再設定し、その後侵食シミュレーションを行った。土柱は侵食に弱い層が複数確認できるので、本研究では地層の数を $N(2 < N < 6)$ の範囲で整数のパラメータとして設定した。侵食に弱い地層には地層ごとに低い方から番号 $n(1, 2, 3, \dots, N)$ をつけ、侵食に弱い地層が始まるボクセル位置の高さを h_n 、地層が持つ厚みを t_n とする。本研究では地層を xz 平面に平行であるとし、 h_n に t_n を加えた高さまでを侵食に弱い地層の 1 つとした。本研究では侵食に弱い地層以外を侵食に強い地層とする。図 3.8 は h_n と t_n を使って侵食に弱い地層の場所を示す図である。

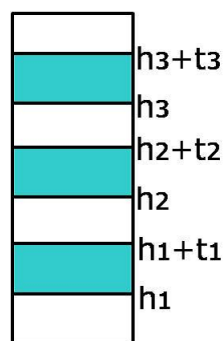


図 3.8: 侵食に弱い地層の位置

土柱領域 $B(n_x, n_z)$ 内で最もボクセル位置が高い地形表面の場所を h_m とし、侵食に弱い地層のボクセル位置の高さ h_n を式 (3.5) から求める。少数の値が出た場合小数点第 1 位を四捨五入し整数の値に変更する、以後高さの値や厚みを求める度に四捨五入を行って整数の値に変更した。

$$h_n = h_m \frac{1}{N+1} n \quad (3.5)$$

厚みとなる値は、式 (3.6) から求める。侵食に弱い地層が始まる h_n から h_{n+1} の中間点までを基本的な厚みとし、さらに整数の一様分布乱数 r を加えた高さを侵食に弱い層とする。 r は式 (3.7) の範囲をとる。

$$t_n = \frac{1}{2} \left(h_m \frac{1}{N+1} \right) + r \quad (3.6)$$

$$-\frac{1}{4} \left(h_m \frac{1}{N+1} \right) \leq r \leq \frac{1}{4} \left(h_m \frac{1}{N+1} \right) \quad (3.7)$$

侵食に強い地層と弱い地層に硬度値を再設定する。侵食に弱い地層の硬度値は、それぞれの侵食に弱い地層の中で最も硬度値を低くするボクセルの高さを一様分布乱数で決定し、そのボクセル位置の高さから離れるほど侵食に強くなる様に、ボクセルの硬度値を設定した。この様な硬度値にすることで、侵食に弱い地層の中でも侵食量に違いが出て、自然な形になる。式 (3.8) は侵食に弱い地層の硬度値を設定する式である。 a はボクセルの硬度値、 t_n は侵食に弱い地層の厚みの設定に使用したパラメータで、 h_w は最も侵食が弱い場所に決定したボクセル位置の高さ、 h_i は再設定を行っているボクセル位置の高さとなっている。 h_w と h_i における高さ位置の差を、厚みに設定した値で割ることで硬度値に 0.9 ~ 1.9 の値を設定する。

$$a = 0.9 + \frac{|h_w - h_i|}{t_n} \quad (3.8)$$

式 (3.8) で求めた硬度値を土柱領域 $B(n_x, n_z)$ 内 h_i の高さの層全てに設定する。周りと比べて高い土柱の場合、2章で述べた図 2.2 の様に「コの字型」に近くなる。そのため、本研究では土柱が持つ最上部の侵食に弱い地層部分だけ、「コの字型」に近くなる様にボクセルの硬度値に一律に 0.9 を設定した。

現実には存在する土柱は侵食が進むと、角ばった形がとれ土柱は丸い形に近づいていく。そのため本研究では土柱領域の中央から外側にいくほど硬度値を低くすることで、土柱が丸い形に近づくように土柱領域内の侵食に強い地層と弱い地層の硬度値に修正を行った。式 (3.9) で土柱領域 $B(n_x, n_z)$ 内の 0.0 を超える値の全ボクセルに硬度値の修正を行う。 a が修正後の硬度値で、 a' が修正前の硬度値、 c_x と c_z が土柱領域の中央の位置 x 成分と z 成分である。 c_x と c_z から硬度値の修正を行う位置 li と lk の距離を、土柱領域の中央から 1 辺までの距離で割ることで、土柱領域の中央から離れるほど硬度値を低くした。

$$a = a' - 0.3 \frac{|c_x - li|}{\left(\frac{ls}{2}\right)} - 0.3 \frac{|c_z - lk|}{\left(\frac{ls}{2}\right)} \quad (3.9)$$

図 3.9 は土柱を xz 平面の y 軸方向から見た、土柱領域の広さ s を 4 にした場合の侵食に強い地層の硬度値の設定を示している。土柱領域内の侵食に強い地層は地層内の全てのボクセルに 1.9 を設定した後にさらに、硬度値の修正を式 (3.9) で行った。侵食に弱い地層は式 (3.8) で再設定を行った後、硬度値の修正を行った。硬度値に修正を加えることで侵食に強い地層、弱い地層、共に丸い形に近づくようになる。

1.7	1.8	1.7	1.6
1.8	1.9	1.8	1.7
1.7	1.8	1.7	1.6
1.6	1.7	1.6	1.5

図 3.9: 侵食に強い層における硬度値の修正

その後シミュレーションとして全てのボクセルを探索し、硬度値が0.0を超える値で、土柱の表面となっていた場合その場所のボクセルの硬度値を引いていく。現実の世界では土柱を雨が伝っていくため、柱の下部の方は侵食が進むのが遅い。そのため、本研究では下部のボクセルから引く数値を少なくすることで調整を行った。式(3.10)はボクセルから引く値を算出する式である。 a は修正後の硬度値、 a' は修正前の硬度値、 q はパラメータとして設定し硬度値から引く実数値、 h_m は土柱領域 $B(n_x, n_z)$ 内で地形表面が最も高い位置、 h_i は現在値を引いているボクセル位置の高さである。ボクセルから引く値に土柱の最も上の高さとも最も下の高さで、 q の2倍の差がでる。

$$a = a' - q - q \frac{h_i}{h_m} \quad (3.10)$$

3.2.6 土柱の除去

土柱の表面で大きく侵食している場所が存在している場合、現実の土柱地形では、その部分から上が崩れる現象が起こる。そのため本研究のシミュレーションでは極端に細くなっている層の上部は除去をおこない、不自然な細さの土柱が存

在することを防いだ。式 (3.11) は除去を行う式である。土柱領域の侵食に弱い地層内において、硬度値が 0.0 のボクセルが最も存在する高さを h とし、0.0 を超える値の硬度値を持つボクセルの数を V_h とする。侵食に弱い地層の高さ h の上部の侵食に強い地層内で、最も低い高さにおける 0.0 を超える値の硬度値を持つボクセルとの数 V_p との比較を行う。

$$V_p - V_h > \frac{s^2}{5} \quad (3.11)$$

式 (3.11) を満たした時、上部の土柱領域の全ボクセルに硬度値 0.0 を設定して除去を行った。図 3.10 は除去が発生する土柱で、図 3.11 は除去後の図である。

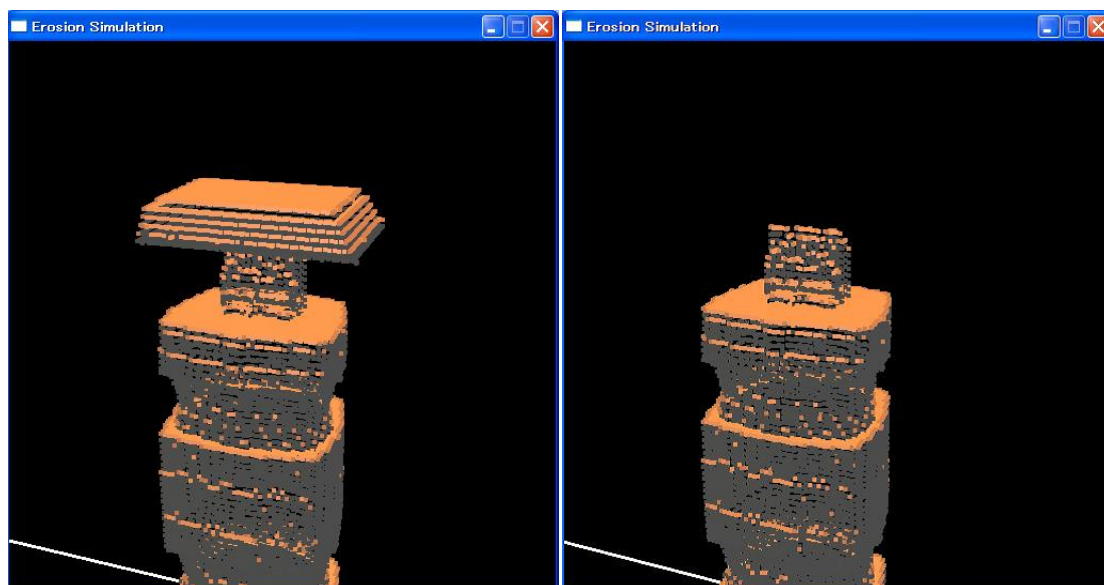


図 3.10: 上部の除去が発生する土柱

図 3.11: 除去後の土柱

第 4 章

結果と考察

本章では 3 章で述べたシミュレーション手法の実行例を示し土柱地形の再現度を検証する。実装には 3D グラフィックツールキットである FK ToolKit System[22] を用いて、侵食シミュレーションの実装を行った。本研究では xz 平面における x 方向と z 方向のボクセル数を 1000、 y 方向のボクセル数を 250、土柱領域の 1 辺を構成するボクセル数 s を 50、地形表面の平均から下げる値 u を 40、侵食の量 q を 0.01 で実装を行った。シミュレーションを行った環境は表 4.1 の通りである。

表 4.1: 実行環境

OS	Windows 7 Home Premium
CPU	Intel(R) Core i7 8209M 1.73GHz
GPU	NVIDIA(R) GeForce GTX 260M
メモリ	4.0GB

4.1 結果

本システムによって生成した結果を以下に示す。図 4.1 は本研究のシミュレーションによって生成した土柱地形である。初期地形の生成から土柱地形全体を生成するのに、2 時間 41 分で生成することができた。それに加え地層の設定により、土柱表面で侵食量が変わる現象を表現することができた。

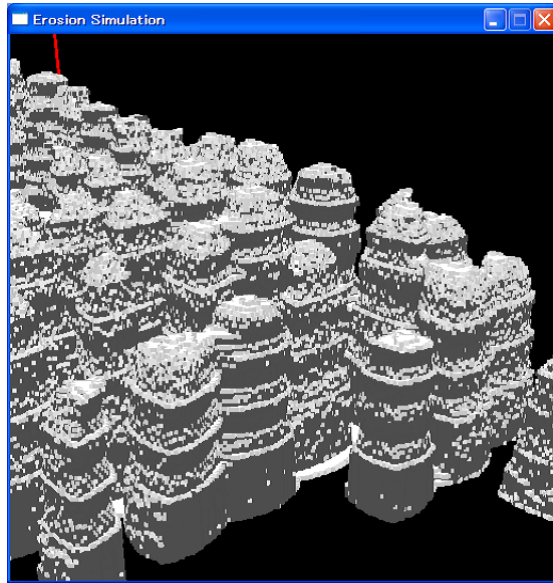


図 4.1: 生成した土柱地形

図 4.2 は侵食シミュレーションによって生成した、極端な細さを持った土柱である。地層の設定に加え、酸性雨による侵食でボクセルの上部から引く値を増やしたことにより、図 4.2 のような、極端な細さを持った土柱を生成することができた。

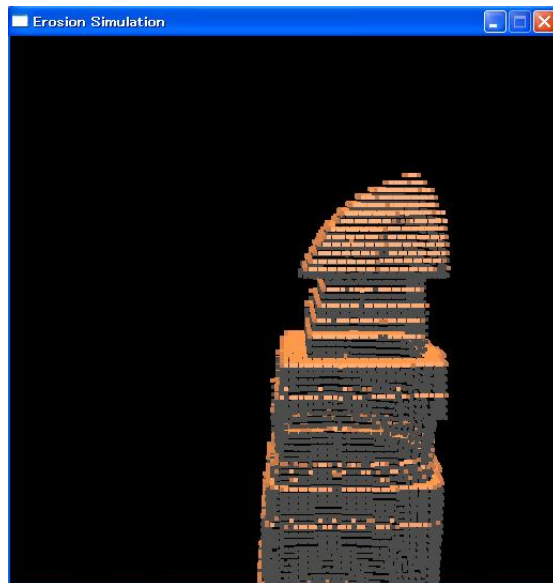


図 4.2: 極端な細さを持った土柱

4.2 考察

本研究の侵食シミュレーションによって、再現できた土柱の特徴を本項で述べる。本研究では土柱地形の基本的な形と、地層によって侵食量が変わる現象を表現することができた。しかし、次のような問題点が挙げられる。本研究では独立した土柱となるように生成を行ったが、実際に存在する土柱は柱どうしが滑らかにつながっている土柱が存在することがある。本研究ではこのような土柱には対応できない。その問題に加え実際に存在する土柱の太さは、太い物から細い物まで多種多様な土柱が存在している。しかし本研究では土柱領域を構成するボクセルの数を固定しているため、太さがそろった土柱ばかりになる。

第 5 章

まとめ

本研究では土柱の特徴を分析し、アメリカに存在する土柱の特徴に沿った地層を設定することで、土柱地形を侵食シミュレーションによって生成することができた。現在の手法で土柱の途中で侵食量が変わる形状や、極端に高い土柱が存在しコの字型に侵食が起こる形状を表現することができた。

本研究のシミュレーションでは土柱を形成する主要の要因である、雨、氷、酸性雨による3種類の侵食で地形生成を行った。しかし更にリアリティのある地形を生成したいと考えた場合、この3つの侵食だけでは十分とは言えない。実際の土柱地形では、風による侵食も影響は少ないが土柱の形成に影響している。主要3つの侵食に加え風の向きや風力を考慮した、侵食を加えることでより現実的な地形が形成できると考えられる。

謝辞

本研究を締めるにあたり研究の指針や開発の手法、論文の執筆など幅広くご指導、ご教授を頂いた本校メディア学部の渡辺大地講師、並びに三上浩司講師に深く感謝いたします。そして、大学での研究、生活を応援してくれた家族、つらい時に激励してくれた多くの友人。また、研究について親身に相談に乗って下さった竹内亮太先輩、修士課程の阿部雅樹先輩をはじめとするゲームサイエンスプロジェクトの先輩方にも深く御礼申し上げます。そして何より、共に励まし合い、苦楽を乗り越え、研究に励んだゲームサイエンス研究室に所属する多くの仲間達。皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 千葉 則茂, “自然物体のCG表現とその応用”, テレビジョン学会誌, Vol.46, No.7, pp.906-914, 1992.
- [2] 小笠原 祐治, 村岡 一信, 千葉 則茂, “温度や湿度の局所的な環境条件を考慮した苔のビジュアルシミュレーション”, 芸術科学会論文誌, Vol.2, No.1, pp.31-39, 2002.
- [3] B, Benes. X, Arriaga, “Table Mountain by Virtual Erosion”, In Proceedings of Eurographics Workshop(2005) on Natural Phenomena, pp33-40.
- [4] 伊藤智也, 藤本忠博, 千葉則茂, “柱状節理の形成過程を考慮した岩場形状モデリング”, 芸術科学会論文誌 Vol.3 No.1 pp.86 – 95.
- [5] オーム社, “「コンピューターグラフィックス理論と実践」”, pp1021-1028.
- [6] Belhadj.F, “Terrain Modeling: a Constrained Fractal Model”, In AFRI-GRAPH '07.
- [7] Fournier,A., D. Fussell, and L Carpenter, “Computer Rendering of Stochastic Models”, CACM,25(6),371-384.
- [8] Peter Kristof, Bedrich Benes, Jaroslav Krivanek, and Ondrej Stava, “Hydraulic Erosion Using Smoothed Particle Hydrodynamics”, in Computer

- Graphics Forum (Proceedings of Eurographics 2009) vol. 28 No.2, 2009, pp. 219-228.
- [9] F.Kenton Musgrave, Craig E. Kolb, and Robert S. Mace, “The synthesis and rendering of eroded fractal terrains”, In SIGGRAPH 89Proceedings, pages 41-50. 1989.
- [10] “BryceCanyon.com - Bryce Canyon National Park - Bryce Canyon Information”. <<http://www.brycecanyon.com/geology.html/>>.
- [11] “Bryce Canyon National Park - Hoodoos (U.S. National Park Service)”. <<http://www.nps.gov/brca/naturescience/hoodoos.htm>>.
- [12] 平朝彦, “「地層の解説」”.
- [13] 千葉 則茂, 青木 富雄, 斎藤 伸自, “物体形状の Voxel 表現に基づく一定義法”, 情報処理学会論文誌, Vol.31, No.3, pp.433-443, 1990.
- [14] 藤本忠博, 今野晃市, 千葉則茂, “ポイントグラフィックス概説”, 芸術科学学会論文誌 Vol3(No1), pp.8-21.
- [15] 竹内亮太, 渡辺大地, “異なる物質の特性を表現した点群形状モデリング手法の提案”, 情報処理学会研究報告グラフィクスと CAD 研究会報告 Vol.2008(No.80), pp. 23-28 (2008).
- [16] Dante Treglia, 中本浩, 川西裕幸, “「Game Programming Gems 日本語版」” pp489-492, 株式会社ボーンデジタル, 2001.
- [17] Dante Treglia, 中本浩, 川西裕幸, “「Game Programming Gems7 日本語版」” pp331-340, 株式会社ボーンデジタル, 2008.
- [18] Albert-Laszlo Barabasi, “「Fractal Concepts in Surface Growth」”, Cambridge University Press 1995.

[19] Elmar Langetepe, Gabriel Zachmann, 中本浩, “「空間的データ構造とアルゴリズム」” pp3-6, 株式会社ボーンデジタル, 2007.

[20] “勾配ベクトル”, <<http://www12.plala.or.jp/ksp/vectoranalysis/ScalarFieldGrad/>>.

[21] 画像処理標準テキストブック編集委員会, “「画像処理標準テキストブック Image processing」”, pp268, 画像情報教育振興協会, 2001.

[22] 渡辺大地, “FineKernelToolKitSystem.” <<http://fktoolkit.sourceforge.jp/>>.