

## 柱状節理の形成過程を考慮した岩場形状モデリング

伊藤智也 藤本忠博 千葉則茂

岩手大学

### Modeling of Rock Form Taking into Account Growing Process of Columnar Joints

Tomoya ITO, Tadahiro FUJIMOTO and Norishige CHIBA

Iwate University

E-mail: {tomoya, fujimoto, nchiba}@cis.iwate-u.ac.jp.

#### 論文概要

本論文では、柱状節理の形成過程のシミュレーションに基づく、岩場形状のモデリング手法を提案する。節理形状は岩場景観の視覚的特徴を与える重要な要因の一つであるが、これまで節理形状の形成に基づく岩場景観の生成技術に関する研究例は極めて少ない。本提案手法は、(1)初期溶岩形状に対する熱伝導シミュレーションによる温度分布の生成、(2)温度分布から収縮中心線の生成、(3)収縮中心線を母線としたボロノイ領域分割、および(4)風化シミュレーションのステップからなる。また、計算の効率化のために、(1)には低解像度のボクセル空間を、(2) - (4)には高解像度のボクセル空間を用いている。本手法では、さまざまな境界条件に応じた柱状節理形状が容易に生成可能である。

キーワード：モデリング、自然現象、地形、風化、岩、節理

#### Abstract

In the present paper, we propose a rock form modeling method based on the simulation of the growing process of columnar joints. Joint form is an important factor in modeling which provides the visual feature of rocky scenery. However, there have been few reports on methods for generating rocky scenery taking into account the joint form. The proposed method consists of the following steps: (1) determining the temperature distribution in the given initial lava volume by via heat conduction simulation, (2) determining the contraction center curved lines according to the temperature distribution, (3) defining a three-dimensional Voronoi region corresponding to each of the contraction center curved lines, and (4) simulating weathering phenomena. For efficiency of computation, we use a voxel space of low-resolution for (1) and a voxel space of high-resolution for (2)-(4). Using this method, we can easily produce various types of columnar joint form by specifying the appropriate boundary conditions.

**Keywords:** modeling, natural phenomena, topography, weathering, rock, joint

## 1. はじめに

CGによる自然景観の表現手法の開発において、地形は基本的な景観構成要素として、重要な研究対象の一つである。しかしながら、地形の中でも岩場地形の表現法に関する研究の報告例は少ない。これまで、CGにおける架空の地形モデルの生成法としては、フラクタルノイズに基づく手法や侵食シミュレーションに基づく手法などがあげられる。前者では、かつて中点変位法やFFTによるノイズ生成法など統計的な手法に基づく架空の地形の表現法[1,2,3,4,5 など多数]として活発に研究された。一方、シミュレーションにより地形を生成する手法として、水による侵食、運搬、堆積、風化などのシミュレーションに基づくものが提案されてきている[6,7,8]。しかしながら、節理形状による特徴的な構造を持つ岩场景観の表現法に関する研究例としては、筆者等の方状節理の生成に基づく手法の提案[9]以外見あたらない。なお、既提案手法は、実際の形成過程は異なるが、形状的には板状節理の生成にも使用可能である。

自然の多くの岩場形状では、節理と呼ばれる明瞭なひび割れ形状が重要な視覚的特徴を与えている。節理には、割れ方の規則性や割れ目の生成過程の違いにより分類される、「柱状節理」、「板状節理」、「方状節理」などがある。本論文では、溶岩の冷却時において生成される「柱状節理」に注目し、柱状節理の形成モデルに基づく岩場地形の生成法を提案する。具体的には、低解像度での3次元格子（ボクセル空間）による熱伝導シミュレーション、高解像度のボクセル空間で節理の収縮中心点の生成、収縮中心点から柱状節理の軸となる収縮中心線の生成、収縮中心線からの柱状節理構造の生成、および風化シミュレーション法について説明する。なお、本手法は、ユーザが視覚的に確認しながら岩場地形を生成できるようなシステムとして実現している(図1)。ユーザは各種パラメータの設定や各処理を同一画面上で視覚的に確認しながらシミュレーションによるモデリング作業を行うことができる。

## 2. 柱状節理と斜面の風化について

本研究における表現対象である柱状節理

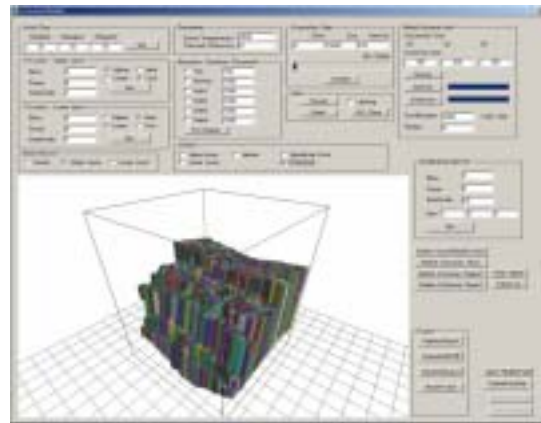


図1 本システムの画面例

(図2)の特徴と斜面の風化について、文献[10,11,12]に基づいてまとめておく。

### 2.1 柱状節理の特徴

柱状節理は、岩盤中に長い角柱の形状としてひび割れが連続して生成される節理で、特異な地形を形成する。火山岩や貫入岩などのマグマが地中や谷などに進入や流下した後にできる冷却固結した岩盤には、収縮による熱応力によって角柱状のひびが生成される。冷却面で観察されるひび割れ形状は3～8角形で、多くは5～7角形である。柱状節理の柱の方向は、重力の方向とは関係なく、溶岩の冷却時の等温線に対して垂直となる(図2(a))。柱状節理には、柱状に延びる部分と柱状にはならない部分があり、前者はコロネード(colonnade)、後者はエンタブラチャー(entablature)と呼ばれている(図2(b))。一般にはコロネードは溶岩内部で温度勾配の向きがほぼ一定である部分に生成され、エンタブラチャーは冷却面から離れた岩盤内部の温度勾配が存在しない部分に生成されるものである。後者は中央部付近では温度が均一となり等温面となるものが存在しなくなるためである。柱状節理の柱形状は溶岩冷却によって生成された岩盤が、風、波、水流などから受ける風化・侵食作用によって地表に現れ、観察可能な地形が形成される。

大気や地表などの冷却面から、コロネード領域からエンタブラチャー領域にかけての柱状節理の形状は、溶岩冷却時の環境によりいくつかのパターンが観察されている。文献[10]から形状による分類を図3に示す。

図3(a)は、溶岩が複数の冷却面(この場合

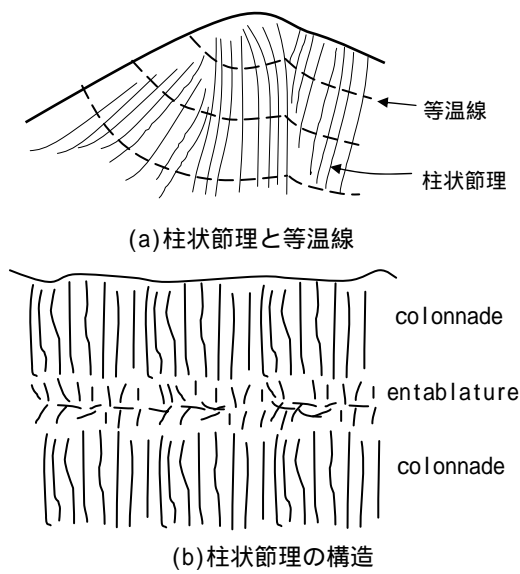


図2 柱状節理の構造

は上下2面)から冷却されるときに、柱状節理がそれぞれの冷却面から独立に生成される例である。図3(b)は、点状の溶岩噴出部分から噴出した溶岩が冷却面から冷却され、柱状節理が冷却面(この場合は半球面)から噴出部分に向かって生成される例である。図3(c)で示されている扇型形状は、流下した溶岩流が谷を埋めた状態で、大気から冷却されて谷底に向かって生成される柱状節理の例である。図3(d)は、溶岩の冷却過程において冷却面と地面の関係によって等温度面が湾曲している場合に生成される柱状節理の例である。柱状節理の形状は、溶岩周辺の幾何的な条件や冷却過程に大きく支配されるものである。

特徴的な柱状節理が観察される地形は、玄武洞(岩手県、図4(a)、chevron型)、Devil's Tower(アメリカ、ワイオミング州、図4(b)、fan型)[13]、Giant's Causeway(北アイルランド、図4(c)、chevron型)[14]、東尋坊(福井県)[15]、玄武洞(兵庫県)[16]、層雲峡(北海道)[17]などが有名であるが、火山国の日本では、多くの場所で観ることができる非常に一般的な地形である。

## 2.2 岩場地形の風化について

風化とは、“岩石が自然作用の働きによりルーズな岩質物体変化する過程”である。節理やひび割れは、風化パターンに大きく影響を与え割れ目の間隔が密な場合は、割れ目の間隔が広い場合に比べ風化・侵食が盛んに起

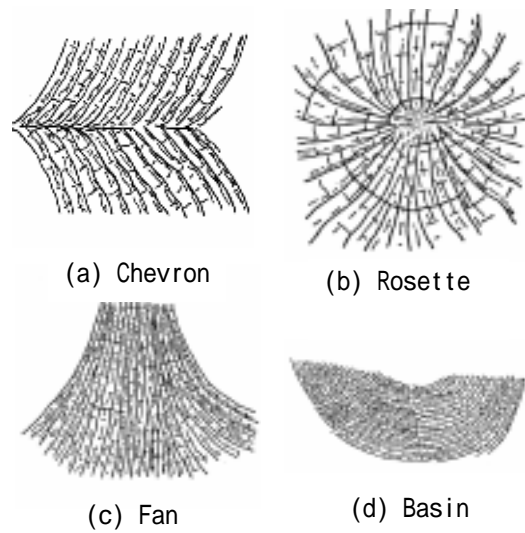


図3 柱状節理の形状分類[10]



図4 特徴的な柱状節理地形

こる。自然の地形では風化作用により、岩盤が崩壊・移動などの形状変化がおり我々が観察することのできる地形へと変化する。岩盤へ機械的(物理的)な風化作用だけが働く場合、風化量は破砕物の大きさの増加にしたがい減少する。また、風や降雨などにより上方からの風化作用が起こることも観察されている。溶岩内部で形成されている柱状節理構造は、外的要因によって、はぎ取られやすい構造であり、波や水流による侵食作用により岩盤の崩落や移動がおこる。節理は、岩盤の崩落を引き起こす要因となり、割れ目の形態が、その岩盤の力学的性状の大半を支配し、岩石自体の特性はあまり重要ではない。

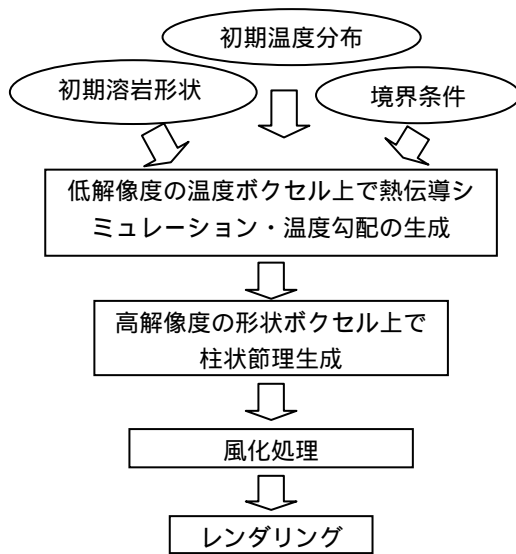


図5 アルゴリズムの概要

### 3. 柱状節理形状の生成法

ここでは、柱状節理形状の生成アルゴリズムについて説明する。アルゴリズムの概要を図5に示す。

本手法では解像度の異なる2種類のボクセル空間を使用して柱状節理形状を生成する。計算コストが大きい3次元熱伝導シミュレーション用の低解像度のボクセル空間と、柱状節理の幾何形状定義用の高解像度のボクセル空間を用意する。ボクセルは以下の情報を格納する。温度分布は節理形状に対して緩やかな変化をもつので、熱伝導シミュレーションは相対的に低解像度のボクセル空間で構わない。

温度ボクセル：温度，温度勾配，領域属性  
 形状ボクセル：濃度，各角柱を識別するためのインデックス

ここで、形状ボクセルにおける濃度とは、単位ボクセルあたりの岩の質量である。なお、本手法における物理量は仮想的なものである。

以降、本手法で使用する各手法について説明する。

#### 3.1 温度分布の生成

温度ボクセル領域内において、各属性に応じて次の初期条件（境界条件）を設定する。  
 ・大気，地面による冷却領域：低温度で一定

- ・岩盤内部の緩冷却領域：高温で一定
- ・柱状節理が生成される領域（溶岩）  
 また境界条件として熱伝導シミュレーション領域外との温度勾配は0とする。  
 溶岩内部の熱分布の作成には3次元の熱伝導方程式を用いる(式1)。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha (\nabla^2 T) \quad (1)$$

α：熱拡散率

T：温度

3次元熱伝導シミュレーションの1ステップ毎に、各ボクセル(i, j, k)の温度T(i, j, k)を更新する。1ステップで更新されるTの離散形は式(2)で表される。

$$\Delta T_{(i,j,k)} = \alpha (T_{(i+1,j,k)} + T_{(i-1,j,k)} + T_{(i,j+1,k)} + T_{(i,j-1,k)} + T_{(i,j,k+1)} + T_{(i,j,k-1)} - 6T_{(i,j,k)}) \quad (2)$$

α：熱拡散率

T(i, j, k)：ボクセル(i, j, k)での温度

T(i, j, k)：次ステップでの温度の増減

3次元熱伝導シミュレーション例を図6に示す。この例ではシミュレーション領域の上半分に冷却領域，下半分に緩冷却領域，それら以外の部分を溶岩とし、温度ボクセルのサイズは32×32×32とした。

#### 3.2 温度勾配の生成

溶岩冷却の熱伝導シミュレーションにより生成された温度分布に Sobel オペレータ[18]を用いて各ボクセルで等温度面に対する法線ベクトルを求める。算出した法線ベクトルは単位ベクトル化し、温度勾配として温度ボクセルに格納する。

#### 3.3 柱状節理形状の生成

柱状節理の生成は温度ボクセルを細分割した高解像度の形状ボクセル領域で行う。なお、以下で述べる各収縮中心線の生成処理で使用する形状ボクセル領域での温度分布，温度勾配は、低解像度で作成された温度ボクセルの温度分布，温度勾配を Tri-Linear（三重線形補間）フィルタによる線形補間により求めている。



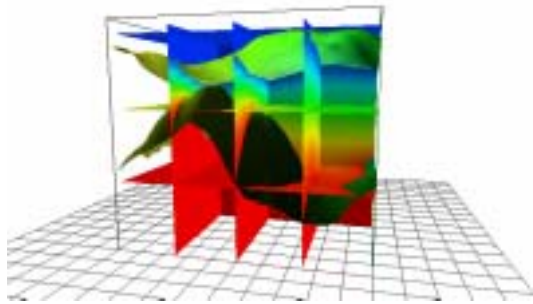


図6 熱伝導シミュレーション例 .

### 3.3.1 収縮開始点の決定

形状ボクセル上で溶岩と大気・地面との境界とされる冷却面上で溶岩収縮の開始点となる点を2次元平面上で、ポアソンディスクサンプリング[19]により生成する。冷却面が曲面形状の場合は、2次元平面上で作成した分布からマッピングの処理を行うことにより開始点の分布とする。

### 3.3.2 収縮中心線の決定

上記で求めた収縮開始点のそれぞれについて、収縮開始点  $P_0$  から、その点を端点とする柱状の芯となる収縮中心線  $L$  を発生させる。各収縮開始点から等温度面の法線ベクトルを進行方向として、溶岩領域を温度の高い方へ進ませることにより、収縮中心線を生成する。収縮中心線上の点  $P_{i-1}$  から進行する点  $P_i$  は次の式で更新される(式3)。

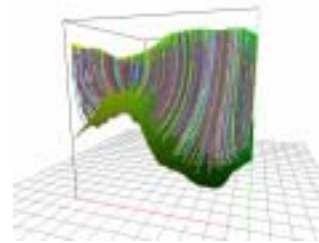
$$P_i = P_{i-1} + Kf \cdot \Delta P_{i-1} \quad (3)$$

$Kf$  は伸長線を増長させる量を決定する定数、 $\Delta P_{i-1}$  は点  $P_{i-1}$  上での温度勾配である。

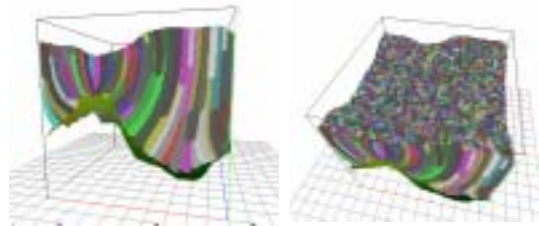
開始点  $P_0$  から終点  $P_n$  までの点列で構成される各収縮中心線  $L$  は、連続した線分で表される(式4)。

$$L = \{P_0P_1, P_1P_2, \dots, P_{n-1}P_n\} \quad (4)$$

収縮中心線の進行処理は、1)ボクセル領域外に出た場合、2)温度勾配が0の場合、3)大気、地面と定義された溶岩以外の領域に到達した場合のいずれかで処理を中断し、次の開始点での処理を開始する。この時、各中心線には各角柱を識別するためのインデックスが設定されている。



(a)収縮中心線



(b)柱状節理形状

図7 図6の温度分布の状態からの収縮中心線と柱状節理生成結果。

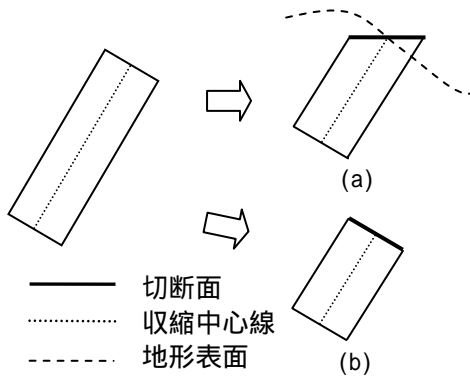
### 3.3.3 柱状節理の生成

収縮中心線を母線として、以下のように溶岩領域で3次元デジタルポロノイ領域分割を行う。形状ボクセルの溶岩の各セルの中心から最短距離にある収縮中心線を探索し、収縮中心線のインデックスを各柱のインデックスとしボクセルへ記録する。同一インデックスを持つボクセルを柱状節理における一本の柱とする。柱状節理によって分割される柱状の領域をここでは単に“柱”と呼ぶことにする。

形状ボクセルの各ボクセルには、濃度値(単位ボクセルあたりの岩の質量)を格納することで、地形を表現する。そこで、次節で述べる風化処理の初期設定として、柱状節理となる領域のボクセルにはあらかじめ決めた濃度値の最大値  $vol_{max}$  を、大気、地中などの非柱状節理領域には0を格納する。収縮中心線からの柱状節理の生成例を図7に示す。同じインデックスを持つボクセルは同色で表示されている。形状ボクセルのサイズは  $200 \times 200 \times 200$ 、収縮中心点は2000個を冷却面上に生成した。

### 3.4 風化表現

作成された柱状節理構造は溶岩内部での構造である。自然の地形では風化作用により、岩盤が崩壊、移動などの形状変化が起こり我々が観察することのできる地形となる。そのため、形成された柱状節理構造への風化を



(a) 水平方向と一致する切断面  
 (b) 柱と垂直となる切断面  
 図8 柱の切断パターン

考える。風化はそれぞれの柱に対する切断・除去によって近似する。本手法では柱の切断は、次に示す2種類の切断面の方向(図8)を考慮する。

- ・ 水平方向と一致する切断面(図8(a))
- ・ 柱と垂直となる切断面(図8(b))

なお、移動・除去の処理により柱が除去された部分のボクセルには濃度値0を格納する。

### 3.4.1 水平方向と一致する切断面

風化作用が岩盤上面から地形全体に影響を与えることによって形成された地形(例えば、図4(c))では、切断面が水平面と一致することが多い。この場合、本手法では、便宜的にフラクタル地形を、風化を受けた岩盤の概形を与えるものとして利用する(もちろん、ユーザ定義の任意の概形で構わない)。柱状節理が生成された岩盤に対して、単純にフラクタル地形表面と収縮中心線との交差する点で切断面を生成し、地形の外部に存在する柱を除去することによって岩場地形を生成する。

### 3.4.2 柱と垂直となる切断面

地震、波、風といった外的要因による風化作用が引き起こす柱状節理の場合には、伸長方向に対し垂直となる切断面を生成する場合が多い。ここでは、切断・崩落についての単純なシミュレーション法を説明する。

物理的な風化作用に対して、岩盤を表すボクセル空間に、“岩盤の潜在的な風化の受け易さ”を風化度として与え、また柱の崩落(表面の柱の一部または全部が岩盤より剥がれ落ちること)においては、この風化度を“崩落のし易さ”を表す崩落度としても使用する。

本モデルでの風化による柱状節理の崩落は、大きく分けて次の2つの段階でシミュレーションされる。

- (1) 風化度に応じた柱状節理の分割
- (2) 表面にある柱のそれぞれの連結成分についての崩落判定

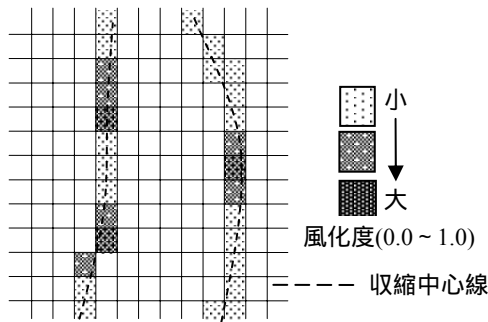
この風化シミュレーションの詳細は以下のようなものである。

Step1: 収縮中心線が交差している全ボクセルに風化度(0.0~1.0)を生成する(図9(a))。(風化度は岩盤全体に分布していると考えるが、計算上は収縮中心線上の風化度のみが必要となるので、こうする。また、例えば、風化度は岩盤内部に比べ表面の近傍では大きい値を持つような単純な風化度分布や、風化度分布に自然な揺らぎを与えるための  $1/f$  ノイズを合成することにより表現する。(もちろん、ユーザが任意に与える分布で良い)。

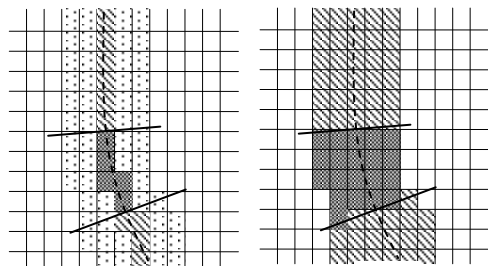
Step2: 全ての収縮中心点について、その中心点が存在するボクセルを探索開始位置とし、探索済ボクセルに、連結成分を区別するための固有のインデックスを与えていく。その際に、収縮中心線が通過する各ボクセルについて一様乱数(0.0~1.0)を生成し、その乱数とそのボクセルでの風化度より小さい場合は、そのボクセルと前のボクセル間に切断が発生したとみなす(これは、ランダムディザのアルゴリズムにより、風化度を反映した切断分布を生成していることと同等である)。そのボクセルを次の連結成分の探索開始ボクセルとし、新たな固有のインデックスを与える。

Step3: 分割された収縮中心線から、収縮中心線に垂直な平面で柱の切断を行う(図9(b))。

Step4: 分割された収縮中心線の各部分で風化度の平均を求める。この風化度(崩落度)の平均がある閾値(“柱の保持限界”)より大きい部分は、対応する柱の分割された部分が崩落するとし、分割された柱の崩落(除去)処理を行う(図9(c))。(風化度の高い部分には短い連結成分が多く発生し、かつそれらは崩落しやすいという傾向が生じる。)



(a) 収縮中心線が存在するボクセルでの風化度の生成例



(b) (c)

—— 切断面  
 - - - - 収縮中心線

(b) 分割された収縮中心線による切断面の生成

(c) ボクセル表現での柱の分割

図 9 収縮中心線のインデックスによるボクセル表現された柱の分割例

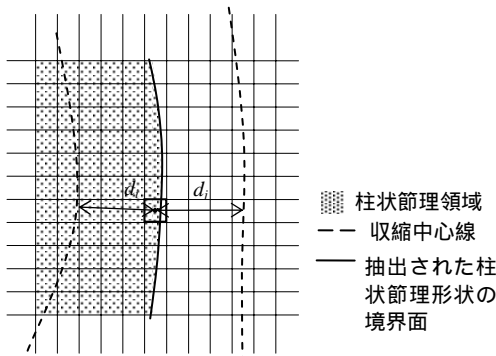


図 10 地形表面部分での濃度値の分配例

### 3.5 柱状節理形状の抽出

ボクセルからポリゴンへの変換は四面体格子法を用いる [20] . ここまでの処理では形状ボクセル上での濃度値は 0 か最大値 volmax のどちらかが格納されており, 各ボクセルは 2 種類の値しか格納されていない. そのため, 地形表面上では階段状のジャギーが発生しやすい. ジャギーを除去する簡単な方法としては, 形状ボクセルに平滑化処理を施してから

四面体格子法を適用することが考えられるが, 形状が必要以上に滑らかになりすぎる. 本研究では, この問題を解決するために, 理想的な柱とボクセルの “ 交差の程度 ” を濃度として再定義する方法を適用した. ボクセルデータのアンチエイリアシング処理として, 濃度値が最大値 volmax を持つボクセルと 0 を持つボクセルとの境界面を共有するボクセルに対して, 近傍収縮中心線の表す理想的な柱との交差の程度を実数値として求め, それにより, 当該ボクセルの濃度として再定義する. この再定義処理を以下に示す.

- Step1: アンチエイリアシング処理の対象となるボクセルの周囲に存在する 26 近傍のボクセルのインデックスより, 隣接する柱のインデックスと柱の個数  $n$  を求める. (柱が除去されているかどうかに関わらず隣接する柱すべてについて考える.)
- Step2: 対象ボクセルの中心と隣接する柱  $i=1,2,\dots,n$  の収縮中心線との最短距離  $d_i (i=1,2,\dots,n)$  を求める, また volume $_i$  を以下のように定める.

$$volume_i = \begin{cases} volmax & \text{柱 } i \text{ が除去されずに存在する} \\ 0 & \text{柱 } i \text{ が除去されて存在しない} \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

- Step3: 再定義処理の対象ボクセルがそれぞれの柱  $i=1,2,\dots,n$  に交差するボクセルの濃度値の割合 ratio $_i (i=0,1,\dots,n)$  を以下のように定める.

$$ratio_i = \frac{1}{n} + \sum_{j=0, j \neq i}^n \frac{d_j - d_i}{n} \quad (6)$$

対象ボクセルの濃度 vol は以下の式で定める.

$$vol = \sum_{i=0}^n ratio_i \cdot volume_i \quad (7)$$

図 10 に 2 次元での分配例を示す. 隣接する柱の収縮中心線との最短距離の差 ( $d_j - d_i$ ) から地形表面部分の各ボクセル濃度値 (交差の程度) を決定する. 実際の計算結果では 2 つ, または 3 つの柱に交差する状態の場合がほとんどを占めた. これはポロノイ領域分割では 4 つ以上の領域の境界となるボクセルが生成されにくいと考えられるためである.

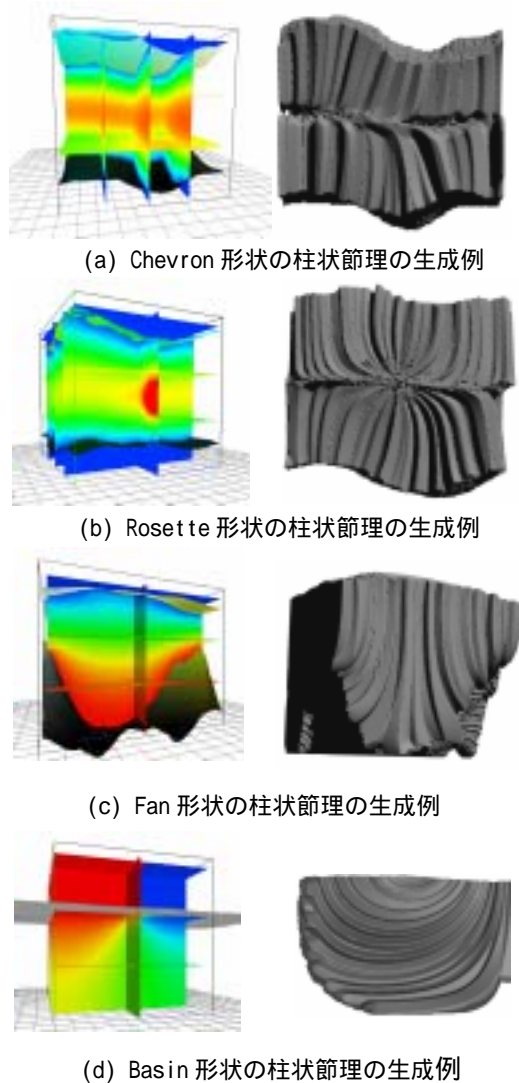


図 11 図 3 で示された各節理形状を生成対象とした画像例。左側の画像は熱伝導シミュレーション画像，右側の画像は柱状節理形状の画像である。

#### 4. 実行結果

本システム（図 1）の柱状節理形状モデリングは，大きく分けて 4 つの段階（図 5）でユーザでの操作を必要とする。

熱伝導シミュレーション：ボクセル解像度，熱拡散率，溶岩の初期温度，溶岩と冷却領域との境界温度，溶岩と緩冷却領域の境界温度を入力，また溶岩と冷却領域との境界形状，溶岩と緩冷却領域の境界形状は 2 次元  $1/f^b$  ノイズにより自動生成し位置はマウスによるドラッグ操作により設定する。

柱状節理生成：収縮中心点数，ポアソンデ

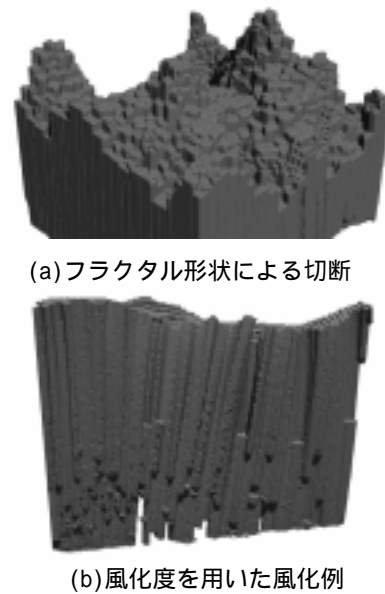


図 12 風化表現の例

表 1 図 11 で使用した各パラメータ。

熱伝導シミュレーション	
ボクセル解像度	32×32×32
熱拡散率	0.1
溶岩の初期温度( )	2000
溶岩と冷却領域との境界温度( )	200
溶岩と緩冷却領域の境界温度( )	2000
柱状節理生成	
ボクセル解像度	250×250×250
サンプリング半径	5
収縮中心点数	(a) 800
	(b) 800
	(c) 400
	(d) 400

イスクサンプリングにおけるサンプリング点の生成禁止領域の半径を入力する。

風化処理：風化方向と節理分布，ノイズのパターンを数種用意しておき，ユーザが選択し風化形状の概形を決定する。

レンダリング：上記で得られた濃度値を持つボクセルデータから 3 角形パッチを切り出し，ポリゴンレンダリングを行う。

図 11 は，本手法を用いて，図 3 の各柱状節理形状の生成を試みた例である。いずれの場合も内部構造の確認のために，ボクセルの側面方向から，いくつかの柱を取り除いてある。使用した各パラメータを表 1 に示す。また，





(a) 崖形状の生成例



(b) 塔形状の生成例



(c) 海岸形状の生成例

図 13 岩場景観への適用例

収縮中心点数以外のパラメータは(a)~(d)で同一のものを使用した。溶岩と冷却領域との境界，溶岩と緩冷却領域の境界それぞれに2次元  $1/f$  ノイズによって生成した曲面を使用した。図 11 (a)は Chevron 型(図 3(a))の柱状節理の作成例である。この場合は冷却面をほぼ平行に2つ配置した。図 11 (b)は Rosette 型(図 3(b))の作成例である。この場合は溶岩内部に溶岩の噴出部分とみなす位置へ球状の緩冷却領域を配置した。冷却面は上下に2面を配置した。図 11 (c)は Fan 型(図 3(c))の扇

表 2 図 13 で示した生成例での各処理時間(s)

	図 13(a)	図 13(b)	図 13(c)
収縮開始点配置	0.032	0.047	0.047
収縮中心線配置	10.656	9.312	14.437
柱状節理生成	34.313	37.906	50.437
風化处理	3.468	4.625	45.0
形状抽出	1416.031	488.609	1483.266

形状の作成例である。この場合は，冷却面はほぼ平面とし，溶岩が流入してくる谷の部分とする下部の緩冷却面を一つの大きな凹曲面形状として配置した。図 11 (d)は Basin 型(図 3(d))の作成例である。この場合は，柱状節理の進行方向が円形状であるために，冷却中の等温度面が放射状であったと考えられる。等温度面が放射状とするために，緩冷却領域と同じ高さに冷却領域を配置した。図 3 で示した形状分類に対応した特徴をもつ柱状節理が生成できることが観察できた。

風化处理例を図 12 に示す。図 12(a)は，フラクタル形状によって柱が切断された生成例である。この例では柱状節理の特徴である，3~8角形の断面が生成されていることが確認できる。

図 12 (b)は図左下部分に近づくに従い風化度を大きく設定した風化シミュレーション例である。分割された柱の各部分の崩落度は風化度から求められているため，風化度の高い部分の柱が切断，除去されている。

図 13 は柱状節理の岩場景観画像の作成例である。図 13(a)は，図 12(b)のデータを使用し，図 4(a)で示した柱状節理による崖形状の生成例である。溶岩と冷却領域との境界，溶岩と緩冷却領域の境界にノイズによる凹凸を持たせたため，柱状節理が直線な構造を持つのではなく，湾曲していく形状が確認できる。図 13(b)は，図 4(b)で示した塔形状の生成例である。実際の Devil's Tower (図 4(b))の生成条件に似た地形構造の条件として，下部の溶岩と緩冷却領域の境界を中心が窪んだ凹形に設定した。簡単な形状ではあるが，実際の地形と似た条件を設定することにより，実際の地形と似た形状を生成することが確認された。図 13(c)は，図 4(c)で示した岩場海岸の生成例である。この場合の海岸では，海の隆起，沈降などによって地形全体が一様な侵食・崩壊現象が起こっているため，フラクタル地形による柱の切断結果を適用して作成し

た。

各形状ボクセルの解像度は，(a):500×300×50, (b):200×200×200, (c):300×300×300である。表2に図13で使用した形状の生成時における各処理での処理時間を示す。使用したCPUはPentium IV 3.06GHz, メモリは1.0GBである。

## 5. おわりに

本論文では，自然の岩場地形にみられる柱状節理に注目し，溶岩の冷却過程を考慮した柱状節理形状の生成シミュレーション法を提案した。本手法では，さまざまな境界条件に応じた柱状節理形状が容易に生成可能である。

今後の課題として，柱状節理の景観映像生成に適したテクスチャの生成法，物理的な風化・侵食を考慮することによる柱状節理景観の表現力の向上，ボクセルからのポリゴン出力時に柱状節理の特徴が反映される表現方法などがある。また，落下した岩石の堆積シミュレーション[21]などの適用もあげられる。

## 謝辞

本研究の一部は，通信・放送機構「地域提案型研究制度」に係わる研究開発課題による。

## 参考文献

- [1] Voss, R.F., Random Fractal Forgeries, Fundamental Algorithms for Computer Graphics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp.805-835, 1985.
- [2] K.Anjyo, A Simple Spectral Approach to Stochastic Modeling for Natural Objects, Proc. Eurogr. Aphics '88, pp.285-296, 1988.
- [3] 中嶋正之, 宮田一乗, 安居院猛, 三次元自然形状の疑似符号化について, 情報処理学会研究会資料, グラフィクスとCAD, pp.20-1, 1986.
- [4] 中嶋正之, 宮田一乗, 安居院猛, フラクタル次元に基づくデジタル図形の疑似符号化について, 信学技報, IE85-13, 1985.
- [5] D. S. Ebert, F. K. Musgrave, D. Peachey, K. Perlin and S. Worley, TEXTURING & MODELING - A Procedural Approach - Third Edition, MORGAN KAUFMANN, pp.429-505, 2002.
- [6] Musgrave, F.K., Kolb, C.E. and Mace, R.S., The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains, Computer Graphics, vol. 23, no.3, pp.41-50, 1989.
- [7] N. Chiba, K. Muraoka and K. Fujita, An Erosion Model Based on Velocity Fields for the Visual Simulation of Mountain Scenery, The Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 9, pp.185-194, 1998.
- [8] P. Roudier and B. Peroche, Landscapes synthesis achieved trough erosion and deposition process simulation, Eurographics, 12(3), pp.375-383, 1993.
- [9] T. Ito, T. Fujimoto, K. Muraoka and N. Chiba, Modeling Rocky Scenery Taking into Account Joints, Computer Graphics International 2003, Japan, pp.244-247, 2003.
- [10] A. Spry, The origin of columnar jointing, particularly in basalt flows, Geol. Soc. Australia Jour., vol.8, pp.191-216, 1962.
- [11] 三木幸蔵, 古谷正和, 土木技術者のための岩石・岩盤図鑑, 鹿島出版会.
- [12] R.J.チョーレー, S.A.シャム, D.E.サグデン. 大内俊二訳, 現代地形学, 古今出版.
- [13] Devil's Tower (アメリカ合衆国)の写真: <http://www.nps.gov/deto/index.htm>
- [14] Giant's Causeway (北アイルランド)の写真: <http://www.northantrim.com/>
- [15] 東尋坊 (福井県, 日本)の写真: <http://www.tojinbo.org/>
- [16] 玄武洞 (兵庫県, 日本)の写真: <http://www3.ocn.ne.jp/~genbudo/>
- [17] 層雲峡 (北海道, 日本)の写真: <http://www.sounkyo.net/>
- [18] 尾上守夫, 他, 画像処理ハンドブック, pp.280-281, 昭晃堂, 1987.
- [19] R. L. Cook, Stochastic Sampling in Computer Graphics, ACM Transaction on Graphics, 5(1) 51-72, January 1986.
- [20] A. Doi, A. Koide: An Efficient Method of Triangulating Equivalued Surfaces by using Tetrahedral Cells, IEICE Transactions on Communications, Elec. Info. Syst, E74(1) 214-224, January 1991.
- [21] 中野誠士, 藤本忠博, 千葉則茂, 粒子要素法的アプローチによる剛体の運動シミュレーション, 芸術科学会論文誌, vol. 2, no.3, pp. 85-86, 2003.