JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	地表に無造作に配置された岩石の生成手法
Author(s)	櫻井，快勢；宮田，一乘
Citation	芸術科学会論文誌，10(3)：98-106
Issue Date	2011-09-15
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/10679
Rights	Copyright (C) The authors 2011. 櫻井快勢，宮田一乘，芸術科学会論文誌，10(3)，2011，98-106.
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

芸術科学会論文誌 Vol. 10, No. 3, pp. 98-106

地表に無造作に配置された岩石の生成手法

櫻井快勢　　宮田一乘

北陸先端科学技術大学院大学

A Procedural Modeling of Various-Sized Rocks on the Ground

Kaisei Sakurai　Kazunori Miyata

Japan Advanced Institute of Science and Technology

{sakurai, miyata} ＠ jaist.ac.jp

アブストラクト

本論文では，異なる大きさの岩石の生成・配置手法を提案する．自然界では，大きさが異なる岩石が地面に無造作に配置されている．これまで提案された岩石の生成・配置手法では，岩石の大きさを制御できないため，大きさの異なりを表現できない．本論文では，この問題を解決する生成・配置手法を提案する．本手法では，岩石の形状を 2 次元のボロノイセルから生成する．母点間の距離を制御したボロノイ図を複数用意し，各ボロノイ図から指定した数のボロノイセルを選択する．これにより大きさの異なるボロノイセルを得る．このとき，ボロノイセルが重ならないように，排他的にボロノイセルを選択する．母点の配置は，Poisson-disk distribution を用いる．Poisson-disk distribution で用いる円形の排他領域の半径を指定することで母点間の距離を変化させ，セルの大きさを制御する．岩石の 3 次元形状を生成するために，2 次元のボロノイセル内に指定した数の頂点を追加し，ドロネー三角化にてメッシュを生成する．つづいて，追加した頂点に高さ情報を付加し，岩石の 3 次元形状とする．本手法を用いることで異なる大きさの岩石を表現することができ，写実的な自然景観の表現と制作の効率化に貢献する．

Abstract

In this paper, we propose a method for generating and placing rocks of various sizes. Previous methods did not control sizes of rocks. To improve the modeling, our method generates rocks by a graph synthesizing some Voronoi diagrams. Each Voronoi diagram is constructed using a set of isotropic sites calculated from Poisson-disk distribution. Each diagram contains uniform-size cells, and the diagram can specify the size of its cells. To construct a graph from these diagrams, a synthesis exclusively selects some cells from each Voronoi diagram, in descending order of size. A triangulation generates a mesh with additional vertices in each cell of the synthesized graph, and then rock shapes are formed by swelling the mesh in three-dimension to form various rock shapes. This procedure alters the sizes of rocks, and can generate more realistic scenes.

1. はじめに

現在，映画やテレビジョンでコンピュータグラフィックス（以下，CG）による映像コンテンツを目にする機会が多い．コンテンツ制作において，CG クリエイタは数多くのオブジェクトを用いて所望の映像を制作する．この際，表現対象の幾何モデルが複雑・高精細であると，多くの作業時間を費やす必要がある．制作時間を削減するひとつの技術が，アルゴリズムにより幾何モデルを生成するプロシージャルモデリングである．プロシージャルモデリングは，繰り返し模様や同様の形状を大量に制作し，制作補助の極めて有効な手法である．

本論文では，地面に無造作に配置されている岩石に注目し，岩石のプロシージャルモデリングを提案する．岩石は，鉱物の集合体であり，その形状は多様である．また大きさも異なる[1].

CG制作にて現実に即した岩石を表現するためには，多様な岩石の形状を多数モデリングする必要があり，手作業による形状の変更や調整などに時間を要する．この問題を解決するために，プロシージャルモデリングを適用する．

本研究では，岩石がまばらに存在する地面から，河原のように岩石が大量に敷き詰められている地面までを表現対象とし，図1に示すように大きさが異なる岩石を生成･配置することを目標とする[17]．

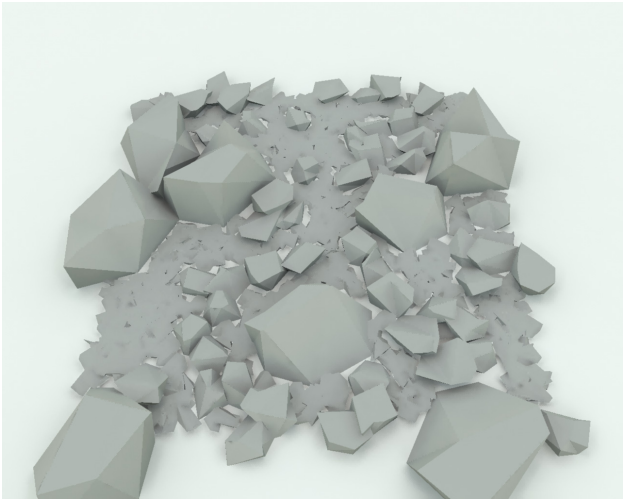


図1 本手法で生成した岩石

2. 関連研究

これまでにも，岩石の生成は，いくつか提案されているが，これらの手法では，本論文が目的としている大きさの異なる岩石を配置することは難しい．

Peytavieらは，3次元空間内にボロノイ図を生成し，ボロノイセルから岩石を生成した[2]． 3次元空間内に256種類の色付き頂点を持つ立方体を用意し，それぞれに母点を配置することで非周期的な母点を得る．この母点から計算したボロノイセルを浸食シミュレーションすることにより,岩石の3次元形状を定義する．Miyataは，2次元平面にグラフを生成し，そのグラフに石の形状を付加することで石垣を生成した[3]．2次元平面に水平・垂直方向に辺を持つ長方形を敷き詰めたグラフを生成し，そのグラフの頂点をランダムに揺らすことで，石の領域を生成する．このグラフのセルに凸型の形状を付加することで，石垣の形状を生成する．Miyataらは， 2次元平面上の与えた閉領域内に正方形を敷き詰め，このパターンから石を敷き詰めた歩道を生成した[4]．この手法では，正方形領域の敷き詰めのためにパーティクルシステムを用いている．

以上で述べた従来手法では，岩石の大きさの差異には注目しておらず，図2 に示すような大きさが異なる岩石の表現は困難である．文献[2] の手法では浸食を計算することで，大きさを調整できるが，浸食作用を大きくすると隙間が大部分を占めてしまう．文献[3] の手法では，個別の岩石の大きさを制御ができない．また，文献[4] の手法は，一様な正方形を敷き詰めるアルゴリズムであるため，本論文で設定した目的を満たすことはできない．

一方，地形生成の手法がいくつか提案されている．岩石に関しては，岩場 [5, 6] や浸食 [7, 8, 9, 10] により地形を表現する．また，フラクタルを用いた手法[11, 12, 13] も考案されている．これらは自然景観の生成手法としては有効であるが，岩石個々について考慮しておらず，本目的を満たすことはできない．

本手法では，文献[3] の手法同様，グラフから岩石の形状を生成するアプローチをとる．文献[3, 4]の手法は，本研究の目的を満たすことはできないが，生成したグラフの形状を保持するため，大きな隙間を作ることはない．この特性から，グラフに含まれるセルの大きさを制御することで，異なる大きさの岩石を違和感なく混在させられると考える．本研究では，複数の大きさを持つセルを生成することで，異なる大きさの岩石を混在させることに成功した．

図2 実際に無造作に配置されている岩石

3. 岩石生成アルゴリズム

無造作に配置されている岩石は，大きさが不均一であり，形状も多様である．単体の鉱物は，結晶の形状がある程度特定できるのに対して，岩石のような集合体になると，形状が多様になる．このような岩石の形成過程をモデル化することは極めて難しく，無造作に配置されている岩石の形状を物理シミュレーションにて生成することは困難である.そのため,本研究では,岩石の形成プロセスはモデル化せずに，岩石の形状をグラフから生成するアプローチを取る．

達成すべき要件としては，1)岩石の大きさに違いがあること，2)岩石の形状が均一ではないこと，の２つの目標を設定した．これを満たすために,2次元平面上で大きさの異なる多角形のセルを持つグラフを生成し,求めたセルから岩石の3次元形状を生成する．

本手法では，複数のボロノイ図を用いて，大きさの異なる多角形のセルでグラフを生成する．セルの大きさを変えた複数のボロノイ図を生成し，それらから指定した数のセルをそれぞれ選択する．その際に，排他的に領域を選択することで，大きさの異なる多角形のセルを持つグラフを生成できる．また，セル

の大きさを制御するために，Poisson-disk distributionを用いて母点間の距離に均一性を持たせる．この母点は非周期的な点群であるため，ボロノイ図を構成したときに多様なセルを生成する．

つづいて，生成された2次元のセル内に発生させた点に高さを与えて，三角メッシュを生成することで岩石形状を得る．

図3に本手法の概略を示す．本手法は以下の手順で構成されており，以降それぞれの手順を詳述する．

1)母点の配置とボロノイ図の生成

2)セルの選択

3)岩石形状の生成

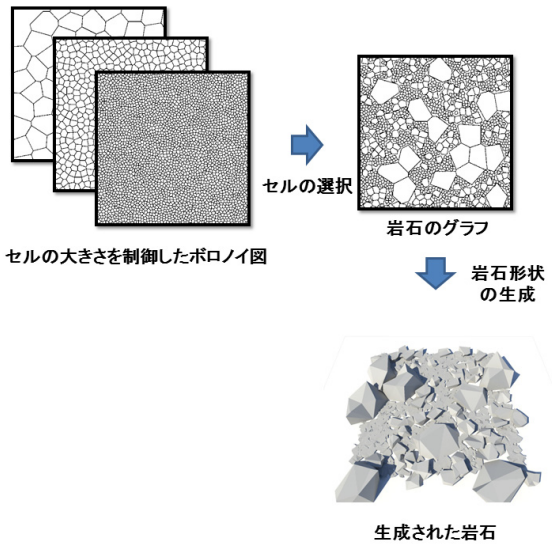


図３ 本手法の概略

```
画像のメモリを確保
画像内の全画素数に対して
  画素に無効のフラグを設定;

発生させる点の数だけ {
 ランダムに画素を選択;
 if 画素のフラグが無効{
      リストに画素の位置を登録;
      画素の位置から半径 r の範囲に対して
        画素に有効のフラグを設定;
 }
}
```

図4 Poisson-disk distribution の擬似コード

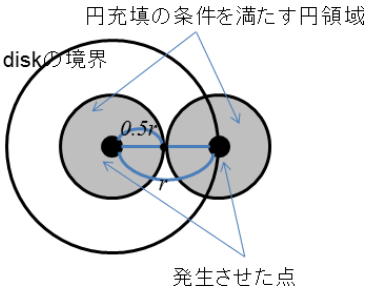


図5 Poisson-disk distributionにおいて最も近い2点と空間の充填に用いる円領域

3.1 母点の配置とボロノイ図の生成

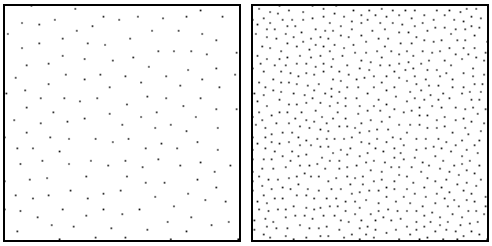
本節での目的は，グラフのセルの大きさを制御することである．この要件を満たすために， Poisson-disk distributionで母点間の距離を制御したボロノイ図を生成する．ボロノイ図は，近隣にある母点の位置に依存して，ボロノイセルが持つ頂点数が変わるため，多様な形状を生成するのに都合がよい．Poisson-disk distributionは，点間の距離を均一に保ち，かつ非周期的な点群を発生することができるため，ボロノイ図を生成したときにセルの大きさを制御でき，かつ，多様な形状となる．本手法では，Poisson-disk distributionの一般的な手法であるダートスローイング法を用いる．ダートスローイング法は，点を追加するときに，円形の排他領域(以後diskと呼ぶ)を設定し，設定された領域には点を追加しない点群の生成手法である[14, 15].

本実装では，2次元点群の発生のために，排他領域の内外判定を2次元配列である画像データを用いて行う．画像の各画素にフラグを格納することで，点の追加の可否を判定する．ランダムに指定した画素のフラグが無効の場合，その位置pをリストにて保持し，pを中心に半径r の領域内のフラグを有効にする．一方，フラグが有効であった場合，点は保持せずに，画素の選択に戻る．指定した点の数（発生させる点の数）になるまで繰り返し処理させ，最終的にリストに保持された点群をPoisson-disk distributionの結果とする．擬似コードを図4に示す．

発生させる点の数N_p は式(1)で与える．

$$N_p = \frac{Ac_d}{\pi(0.5r)^2} \quad \cdots (1)$$

このとき，A は画像の全画素数，c_d はdisk の充填率，r はdiskの半径とする．実験からc_d の値は0.7程度で適切なPoisson-disk distributionが行われることを確認した．式(1)で求める発生させる点の数は，点を発生させる領域Ac_dを，ひとつの円が占める面積で割ることで導いた．発生させた点を中心とする面積Sの円で円充填させた場合に，$N_p S = Ac_d$ が成り立つ．本手法では，すでに配置済みのdiskとの接触の有無で点の発生を判定するため，必ずdisk同士が重なる．図5に示すように，発生させた点で最も近い2点間の距離はrとなる．このとき，円充填の条件を満たすために，円の半径は$0.5r$である必要がある．上記の手続きで生成した母点を図6 に示す．図6(a)と(b)はそれぞれrを10画素と5画素としており，rに応じた距離の点群を発生させていることがわかる．この母点から，ボロノイ図を計算する． 以上の手続きにより，ボロノイセルの大きさを変えたボロノイ図を複数生成する．



(a) (b)

図6 Poisson-disk distributionで半径r を制御した点群
150x150 画素における点の発生 (a) r=10 (b) r=5

3.2 セルの選択

ボロノイ図からセルを排他的に選択し，大きさの異なるセルを持つグラフを1つ生成する．3.1節で複数生成した，セルの大きさが異なるボロノイ図から，領域が重ならないようにセルを選択する．本手法では，画像にフラグを格納することで重なりの判定を実装する．1枚の画像を用意し，この画像に選択したセルの領域にフラグを設定する．このとき，小さなセルから選択すると，排他的な処理であるため，大きなセルが選択できる領域が少なくなる．大きなセルから選択することで密な敷き詰めが可能となる．ボロノイセルの選択は，指定した数，もしくは指定した面積のセルを登録したときに終了する．擬似コードを図7に示す．

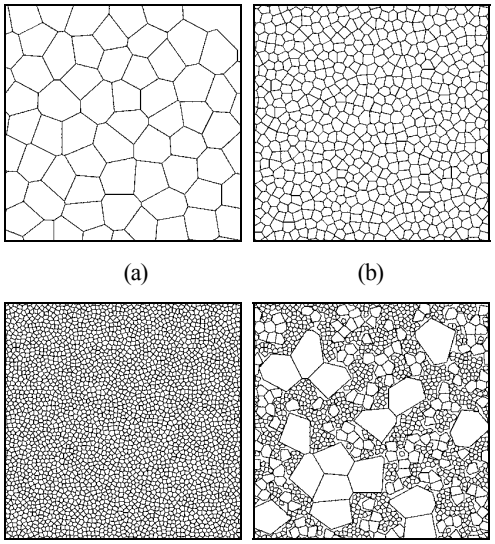
以上の手続きで生成したグラフを図 8 に示す．図 8(d)に示したグラフ内のセルを岩石の領域とする．

```
画像のメモリを確保
画像内の全画素数に対して
 画素に無効のフラグを設定;

ボロノイ図ごとにセルの面積の平均を計算
面積でボロノイ図を降順にソート

全ボロノイ図に対して
 全ボロノイセルに対して
 セルの数または面積が閾値を超えるまで{
  セルをランダムに選択
  if セル内の画素のフラグが無効{
        リストにセルを登録;
        セル内の画素に有効のフラグを設定;
   }
 }
```

図7 岩石のグラフ生成の擬似コード



(a) (b) (c) (d)

図８ 3 ボロノイ図から岩石のグラフを生成した例
(a)(b)(c)の 3 つのボロノイ図から(d)を生成した

3.3 岩石形状の生成

3.2節で生成した岩石の領域から，岩石の3次元形状を生成する．図2に示すように，自然の岩石には欠けや割れた岩石が多数あり，それらを表現する必要がある．図9にこれらの凹凸形状を簡易的に示す．この図のように，接地部か上部が幅広であったり，上部に凹部が存在したり，これらが複合的に存在する．

図9 岩石形状の縦断面例の模式図

本手法では，これらの様々な形状を表現するために，グラフ内の各セルに頂点を追加し，ドロネー三角化にて面を構成したのち，追加した頂点を移動することで3次元形状を形成する．まず, 2次元平面上の岩石の領域内にランダムに頂点p_{add} を配置する．p_{add}の数は，対象のセルの頂点と同数とする．つづいて，p_{add} からドロネー図を構成することにより三角メッシュを生成する．最後に，式(2) (3) で与えたベクトルでp_{add} を移動させる．移動後の頂点p_{add}は岩石の上面を形成し, 3次元の形状が定義される．式(2)は，上面の接面方向の位置を決定する移動ベクトル$\mathbf{t}_{xy}$ を与え，式(3)は岩石の厚みt_z を与える．

$$\mathbf{t}_{xy} = (c_{w1} + c_{w2} j_1 + c_{w3} j_2) \frac{(\mathbf{p}_{add} - \mathbf{g}_{add})}{\| \mathbf{p}_{add} - \mathbf{g}_{add} \|} \quad \cdots (2)$$

$$t_z = (c_{h1} + c_{h2} j_1 + c_{h3} j_2) \quad \cdots (3)$$

このとき，c_{w1}と c_{w2}, c_{w3}, c_{h1}, c_{h2}, c_{h3}, は頂点の移動を制御するパラメータ，j_1は領域毎に割り振る乱数，j_2は頂点毎に割り振る乱数，g_{add} はp_{add} の重心である．本手法では，面を保持したま

ま岩石の領域の内外に頂点を移動する．以上の過程を図10に図示する．

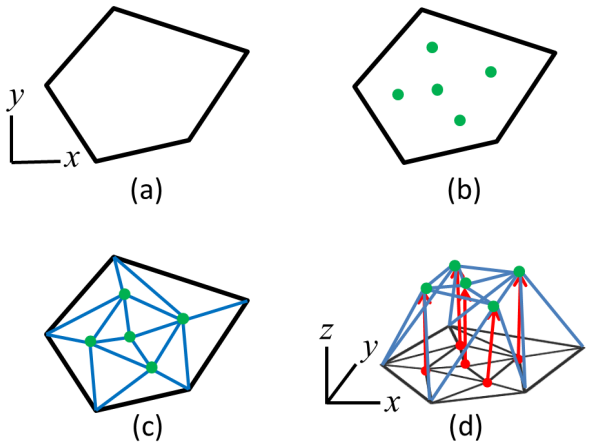


図10 岩石形状の生成

(a) 岩石の領域のセル (黒色の辺)．(b) セル内に配置した点(緑色の点)．(c) 配置した点とセルの頂点で構成するドロネー図(青色の辺)．(d) 与えられたベクトル(赤い線分)に従った頂点の移動．

岩石形成の制御には，式(2)および式(3)中のパラメータ($c_{w1}, c_{w2}, c_{w3}, c_{h1}, c_{h2}, c_{h3}$)を用いる．パラメータ($c_{w1}, c_{w2}, c_{w3}$)は，岩石の上面の接面方向の移動ベクトルを制御する．パラメータ(c_{h1}, c_{h2}, c_{h3})は，岩石の厚みを制御する．c_{w1}は上面の接面方向の移動ベクトルのベース，すなわちテーパー処理のパラメータとなり，c_{h1}は，岩石の厚みのベースとなる．c_{w2}とc_{h2}は岩石毎の乱数の振れ幅を，c_{w3}とc_{h3}は頂点毎の乱数の振れ幅を設定する．すべてのパラメータ($c_{w1}, c_{w2}, c_{w3}, c_{h1}, c_{h2}, c_{h3}$)が0のとき， p_{add}に移動はない．パラメータ($c_{w1}, c_{w2}, c_{w3}, c_{h1}, c_{h2}, c_{h3}$)の単位は画素数とする．

4. 結果と考察

ボロノイ図の母点間の距離を変更して岩石の大きさを制御した結果を図11に示す．これらの結果により，母点間の距離に依存して，生成された岩石の大きさを制御できることがわかる．

ボロノイセルの選択を制御することにより，密度を制御した結果を図12に示す．この例では，3つのボロノイ図を用いて大きさの異なる岩石を生成した．それぞれdiskの半径は90,30,10であり，ボロノイセルの数はおおよそ100, 900, 8100である．図12(a)は，diskの半径が90のボロノイ図が占める割合を領域の半分とした．diskの半径が30と10のボロノイ図は，それぞれ25%とした．同様に，図12(b)と図12(c)は，diskの半径が30と10のボロノイ図が占める割合を領域の半分とした．セルの選択の割合に依存して，指定した岩石が多くなり，密度を制御できることがわかる．

次に，岩石の上面の頂点を制御した例を図13と図14に示す．図13と図14では，図11(a)の生成パラメータをもとに，岩石の上面の接面方向の移動ベクトルを制御するパラメータ(c_{w1}, c_{w2}, c_{w3})と厚みを制御するパラメータ(c_{h1}, c_{h2}, c_{h3})を変更した．c_{w1}を10に設定した図13(a)では，図11(a)に比べて，すべての岩石の上面の幅が広くなることがわかる．c_{w2}を10に設定した図13(b)では，個々の岩石の上面の幅が異なることがわかる．c_{w3}を10に設定した図13(c)では，頂点毎に上面の幅の広がり方が異なることがわかる．図13中の石①に注目すると，図13(a)(b)(c)では，黄線上の頂点に大きな差異がみられない．一方，赤線上の頂点では，図13(c)のみに違いがみられ，頂点毎に上面の幅に広がりが形状に影響を与えていることがわかる．また，図13中の石②に注目すると，図13(a)では頂点が青線上にあるのに対して，図13(b)では，青線の内側にあることがわかる．石①では，差異がみられず，石②では差異が確認できることから，石ごとに上面の幅を変えていることが確認できる．c_{h1}を67 (図11(a)の1.5倍)に設定した図14(a)では，図11(a)に比べて，すべての岩石が高くなることがわかる．c_{h2}を45に設定し，c_{h1}を0に設定した図14(b)では，個々の岩石の高さが異なることがわかる．最後に，c_{h3}を45に設定し，c_{h1}を0に設定した図14(c)では，頂点毎に高さが異なることがわかる．最後に，図1で生成した形状に岩石の質感をテクスチャマッピングした結果を図15に示す．

以上の生成例に対するパラメータと計算時間を表1に示す．実験に用いたコンピュータは，Intel Core i7 (3.07 GHz) CPUと12 GB メモリで構成されている．

本手法は，ボロノイ図を岩石のグラフとして用いた． ボロノイ図のほかに，母点間の距離を制御することで，セルの大きさを変更できる著名な図形としてドロネー図があげられる．多角形は，三角形を組み合わせることで生成可能なため，ドロネー図からの岩石のグラフの生成は可能と考える．ただし，三角形の組み合わせ方を適切に設定する必要があり，その課題を解決することは難しい．そのため，岩石のグラフとしてボロノイ図を用いることは適切であると考える．母点間の距離を制御するために，Poisson-disk distribution を用いた．正方格子や六角格子を用いなかったのは，揺らぎのある配置を表現するためであり，図11 - 14 が示すように，その表現はできていることがわかる．均一性は，本手法のPoisson-disk distribution で十分であることから，母点の配置の均一性を高めるためのリラクゼーション[16]による調整は不必要である．したがって，計算コストが低いという利点を有する．

岩石の形状は，ドロネー図を構成し，頂点を移動することで生成した．多様な形状を生成するために，3次元空間内に乱数を発生させて凸包など3次元空間内のグラフにより形状を生成する方法も考えられるが，この方法であっても凹部の表現には頂点の移動は必要である．また，3次元でグラフを構成した場合，制御する対象が多くなるため，処理が複雑になる．一方，本手法では，岩石の表面上の頂点のみを生成するため，それらの制御で所望の形状を得ることができる．岩石の領域内に頂点を配置するのは，領域外に頂点を配置し，表面を構成しない面の生成を避けるためである．

岩石のグラフを生成するために，複数のボロノイ図から排他的にセルを選択した．この手法では，少しでも重なっているとセルを選択しないため，充填する設定であっても，隙間ができる．これを修正するために，大きなセルに小さなセルの頂点を

フィットさせる必要がある．しかし，グラフの調整を行うと，並んだ面が直線になり，違和感が生じる．そのため，本手法では，調整しない方針を取った．これにより，図8(d) に大きさが異なるセル間に小さな隙間が見えるが，この問題に対する解決は今後の議論が必要である．

本手法は，地表に見える岩石を対象としているため，2次元のグラフから岩石の形状を生成したが，3次元空間内の岩石の重なりは考慮していない．重なりを表現するためには，2次元のグラフから3次元グラフに拡張し，岩石の形状が重なり合うように選択する必要がある．

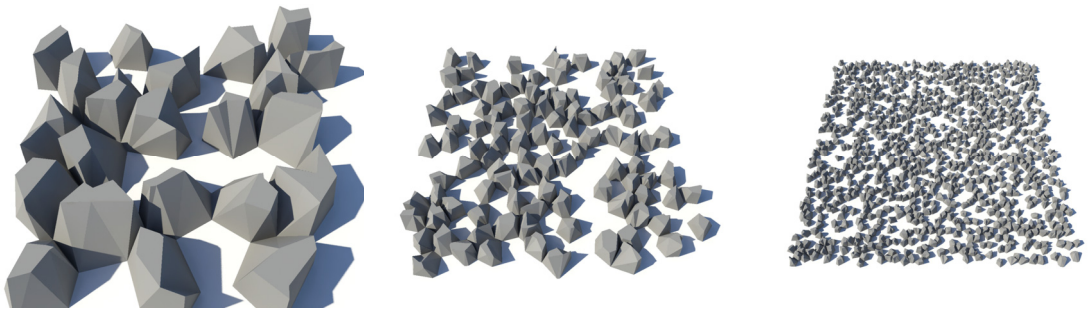
また，岩石の形状は，岩石同士の相互作用を考慮しておらず，岩石の干渉による摩耗や風化を表現していない．より写実的な岩石を生成するためには，摩耗や風化の表現は不可欠であり，今後の課題としたい．

本研究では，岩石のテクスチャ生成は対象外とするが，岩石の表現には重要な要素である．文献１によると，岩石内の結晶は，構成する無機物の特性によって決まると予想されていたが，例外が多くあり，結晶の構造を決める要素は明らかになっていない．そのため，岩石の生成をシミュレーションすることは現状では極めて難しいと考える．

5. まとめ

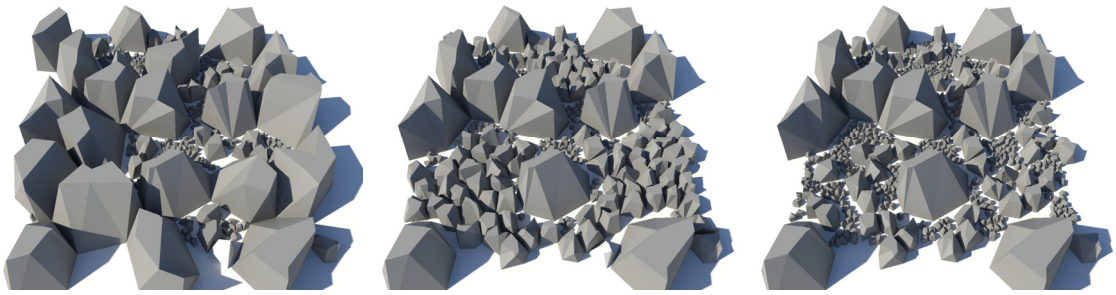
本論文では，自然界で見受けられるような大きさの異なる岩石が多数無造作に配置されているシーンの生成手法を提案した．これを表現するために，母点間の距離を制御したボロノイ図を複数用意し，各ボロノイ図から指定した数，または，指定した面積分のボロノイセルを選択することで，大きさの異なるボロノイセルからグラフを生成する手法を考案した．

本手法を用いることで，地表に存在する多数の岩石を自動生成することができ，幾何モデルデータの制作時間の削減になると考える．



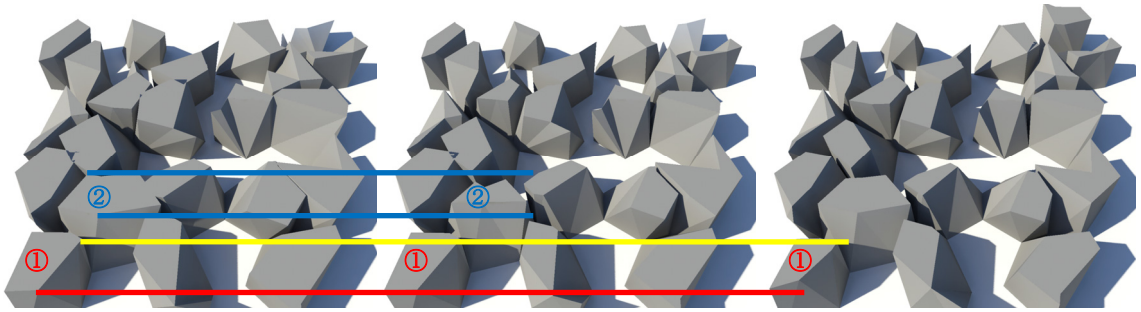
(a) (b) (c)

図11 岩石の大きさを制御した例



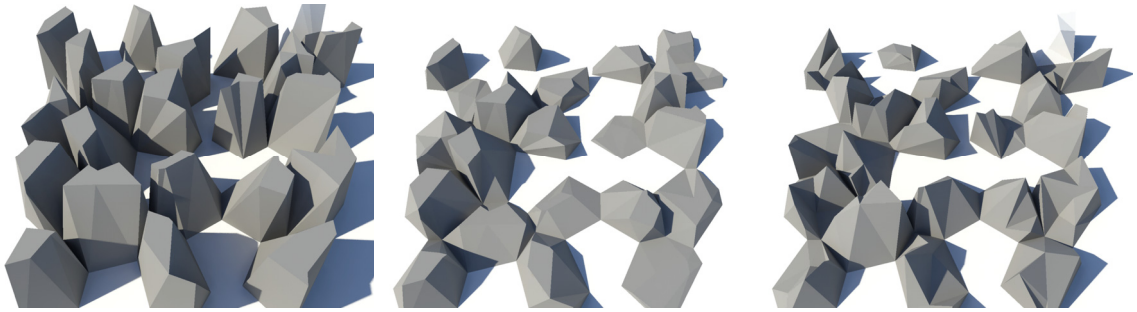
(a) (b) (c)

図12 岩石の割合を制御した例



(a) (b) (c)

図13 岩石の幅を変化させた例



(a) (b) (c)

図14 岩石の高さを変化させた例

表1 生成のパラメータと実行時間: Nはボロノイ図の数，rは式(1)のdiskの半径，A_s はボロノイセルが選択される領域の割合，c_{w1}からc_{w3}は式(2)のパラメータ，c_{h1}からc_{h3}は式(3)のパラメータ，timeは実行時間．複数のボロノイ図を生成するとき，各パラメータを縦に並べて示す．

	図1	図11 (a)	図11 (b)	図11 (c)	図12 (a)	図12 (b)	図12 (c)	図13 (a)	図13 (b)	図13 (c)	図14 (a)	図14 (b)	図14 (c)
N	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1
r	90 30 10	90	30	10	90 30 10	90 30 10	90 30 10	90	90	90	90	90	90
A_s	0.2 0.24 0.56	0.5	0.5	0.5	0.5 0.25 0.25	0.25 0.5 0.25	0.25 0.25 0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
c_{w1}	0 0 2	0	0	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	10	0	0	0	0	0
c_{w2}	6 6 2	0	0	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0	10	0	0	0	0
c_{w3}	6 2 2	0	0	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0	0	10	0	0	0
c_{h1}	14 5 2	45	15	5	45 15 5	45 15 5	45 15 5	45	45	45	67	0	0
c_{h2}	14 5 2	0	0	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0	0	0	0	45	0
c_{h3}	9 3 1	0	0	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0	0	0	0	0	45
time (s)	3.63	0.05	0.75	3.5	3.21	3.22	3.23	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

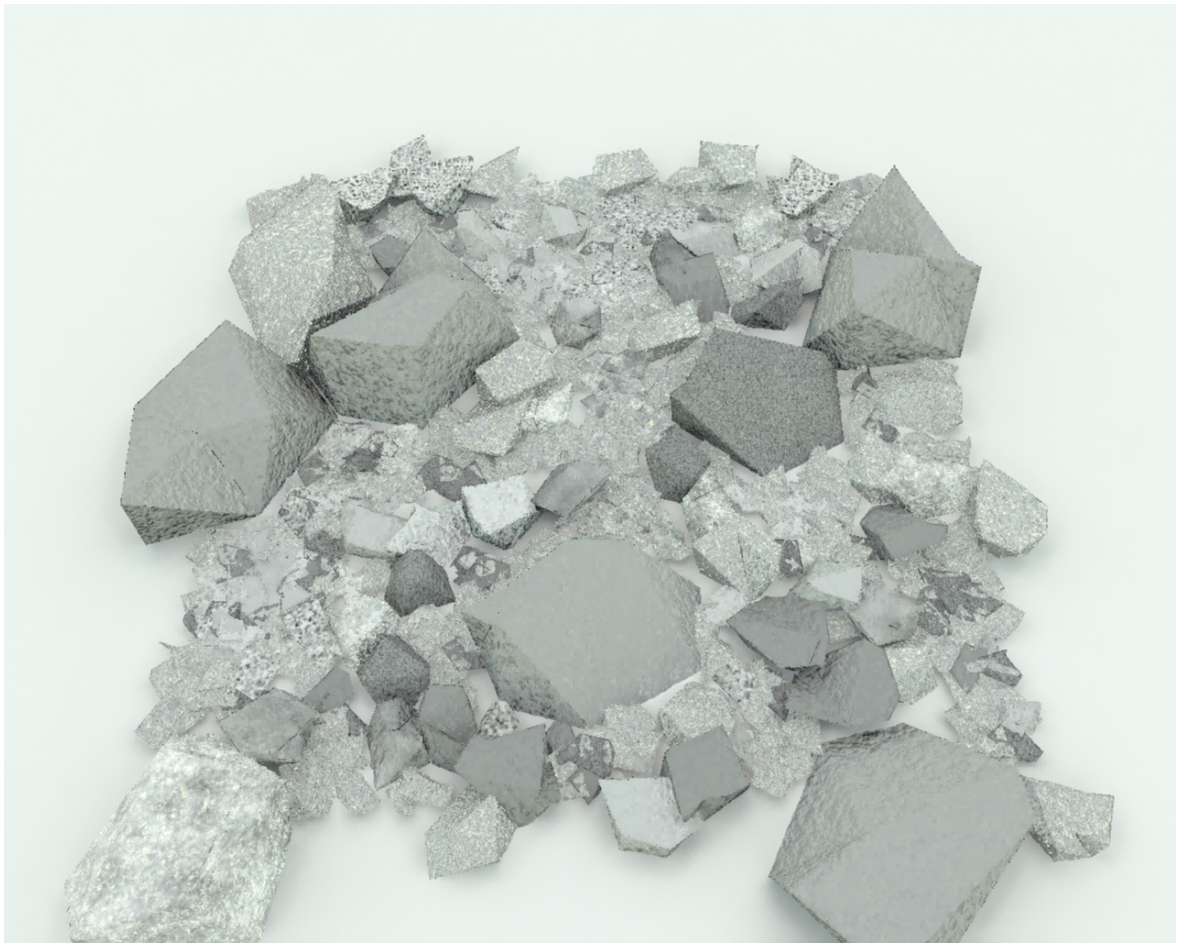


図15 生成した形状にテクスチャマッピングを施した例

参考文献

[1] 松井，坂野，”岩石・鉱物の地球科学”, 岩波書店，ISBN 4-00-007836, 1992

[2] Peytavie A., Galin E., Grosjean J., Merillou S., “Procedural Generation of Rock Piles using Aperiodic Tiling”, Computer Graphics Forum (Proceedings of Pacific Graphics), number 7 volume 28 pp. 1801-1810, 2009

[3] Miyata K., “A method of generating stone wall patterns”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 90, pp. 387-394, 1990

[4] Miyata K., Itoh T., Shimada K., “A method for generating pavement textures using the square packing technique”, The Visual Computer 17 8, pp. 475-490, 2001

[5] 伊藤, 中野, 藤本, 千葉, “崩落岩塊の堆積を伴う岩場景観のシミュレーション”, 芸術科学会論文誌 第3巻 第3号, pp. 197-199, 2004

[6] 伊藤, 藤本, 千葉, “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 第3巻 第1号, pp 86-95, 2003

[7] Neidhold B., Wacker M., Deussen O., “Interactive physically based fluid and erosion simulation”, In Eurographics Workshop on Natural Phenomena 2005, pp. 25-32, 2005

[8] Peytavie A., Galin E., Merillou S., Grosjean J., “Arches: a Framework for Modeling Complex Terrains”, Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics), volume 28, pp. 77-82, 2005

[9] Mei X., Decaudin P., Hu B., “Fast hydraulic erosion simulation and visualization on GPU”, In Proceedings of Pacific Graphics 2007, pp. 47-56, 2007

[10] Kelley A. D., Malin M. C., Nielson G. M., “Terrain simulation using a model of stream erosion”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 88, pp. 263-268, 19988

[11] 千葉，村岡，八重樫，三浦，”尾根線の再帰生成による侵食作用により形成された山岳形状の定義法”, テレビジョン学会誌，Volume 45，Number.10, pp.1240-1248, 1991

[12] Szeliski R., Terzopoulos D., “From splines to fractals”, In Proceedings of GRAPHITE 2005, pp. 77-82, 2005

[13] Musgrave F. K., Kolb C. E., Mace R. S., “The synthesis and rendering of eroded fractal terrains”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 89, pp. 41-50, 1989

[14] Cook R. L., “Stochastic Sampling in Computer Graphics”, ACM

Transaction Graphics, 1986
[15] Mitchell P. D., “Generating antialiased images at low sampling densities”, Copmuter Graphcis volume 21 number 4, pp. 65-72, 1987
[16] McCool M., Fiume E., “Hierarchical Poisson disk sampling Distributions”, In Proceedings of the conference on Graphics interface 92, Morgan Kaufmann Publishers Inc, 94-105, 1992
[17] 櫻井快勢，宮田一乘，”地表に無造作に配置された岩石の生成手法”，第26回NICOGRAPH論文コンテスト

櫻井快勢

2008年北陸先端科学技術大学院大学 博士前期課程 修了. 同年, 大日本印刷（株）入社. 2010年北陸先端科学技術大学院大学 博士後期課程 入学. 現在，北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科博士後期課程 兼 大日本印刷（株）情報コミュニケーション研究開発センター所属. 質感と幾何形状に関する研究に従事. ACM会員.

宮田一乘

1986年東京工業大学大学院・総合理工学研究科・物理情報工学専攻修士課程修了. 同年，日本アイビーエム（株）東京基礎研究所入社. 1998年東京工芸大学学術部助教授. 2002年より，北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター教授. 博士（工学）. コンピューターグラフィックスおよびデジタル映像表現に関する研究に従事. 情報処理学会，芸術科学会，映像情報メディア学会，ACM，IEEE等会員.