

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, 一乗
Citation	第26回NICOGRAPH論文コンテスト予稿集: #V-1
Issue Date	2010-09-25
Type	Conference Paper
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/11426
Rights	Copyright (C) 2010 芸術科学会. 櫻井快勢, 宮田一乗, 第26回NICOGRAPH論文コンテスト予稿集, 2010, #V-1.
Description	

地表に無造作に配置された岩石の生成手法

櫻井快勢 宮田一乗

北陸先端科学技術大学院大学
{sakurai, miyata}@jaist.ac.jp

アブストラクト

本論文は、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、地面に多くの大きさが異なる岩石が無造作に配置されている。これまでの岩石の生成・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、この問題の解決する生成・配置手法を提案する。本手法では、岩石を2次元のポロノイセルから生成する。母点間の距離を制御したポロノイ図を複数用意し、各ポロノイ図から指定した数のポロノイセルを選択する。これにより大きさの異なるポロノイセルを得る。このとき、ポロノイセルが重ならないように、排他的にポロノイセルを選択する。母点の配置は、Poisson-disk distributionを用いる。母点間の距離は、diskの半径を指定することで制御する。各ポロノイセル上に指定した数の頂点を追加し、ポロノイ頂点を含む近隣の頂点により三角メッシュを生成することで岩石の形状を形成する。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。本手法によって、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。

1. はじめに

現在、映画やテレビジョンでコンピューターグラフィックス(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クリエイターは数多くの対象物をコンピューター内で表現し、所望の映像を生成する。この際、表現対象の幾何モデルが複雑であったり、高精細であったりすると、非常に多くの作業時間を費やすことになる。この問題を解決する技術が、アルゴリズムにより画像制作の一部を自動化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するときに極めて有効な手法であり、制作工程を短縮することができる。

本論文は、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、その形状は不均一であり、大きさも異なる[1]。そのため、無造作に配置されている岩石の景観を制作するには岩石オブジェクトの複製のみでは不十分であり、形状の変更や調整などの制作時間を要する。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こととした。

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対象とする。

本研究により、図1に示すように大きさが異なる岩石を生成できるようになる。



図1 本手法で生成した岩石

2. 関連研究

これまでも、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次元空間内にポロノイ図を生成し、ポ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配置する。この母点から計算したポ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領域に従って正方形を敷き詰め、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難しい。[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。[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、[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]も提案されている。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、[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。[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。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、形状もさまざまである。岩石は、鉱物の集合体である。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、集合体になると、形状が不均一である。そのため、形成過程をモデル化することが極めて難しい。すなわち、無造作に配置されている岩石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と考えられる。そのため、本研究では、岩石の形成プロセスを考慮せずに、岩石の形状をグラフから生成することとした。

達成する要件としては、1)大きさに違いがあること、2)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する。

本手法では、ポロノイ図を用いて、大きさの異なる多角形のセルを生成する。セルの大きさを変えたポロノイ図を複数用意し、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、セルの大きさを指定するために、Poisson-disk distributionを用いて母点間の距離に均一性を持たせる。

その後、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。

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説明する。

- 母点の配置とポロノイ図の生成
- ポロノイセルの選択
- 岩石形状の生成

3.1 母点の配置とポロノイ図の生成

本手法では、ポロノイセルの大きさを制御するために、配置する母点間の距離を制御する。ここでは、間隔の制御のために、Poisson-disk distributionを用いる。正方格子や六角格子などを用いると乱雑さがなく、整然としたポロノイ図が生成される。整然としたポロノイ図では無造作な岩石を表現できないため、本手法では、点間の距離がほぼ均一でかつ揺らぎがある点の配置が必要である。Poisson-disk distributionは、この条件を満たす点群を発生させることができる。本手法では、基礎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、指定した半径内に他の点が含まれないように点を追加する手法である[14, 15]。本手法では、画像にフラグを格納することで内外判定を行うように実装する。ランダムに画素を指定し、その画素にフラグが無効の場合、その位置を保持し、その位置を中心に半径 r の領域のフラグを有効にする。一方、フラグが有効であった場合、点を保持せずに、画素の選択に戻る。このとき保持した点が配置された点とする。擬似コードを図3に示す。

```
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代入;

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
            画素のフラグに有効を代入;
    }
}
```

図3 Poisson-disk distribution の擬似コード

本手法では、図3の擬似コード中のリストから取り出した位置を母点とする。

発生させる点の数 N_p は式(1)で与える。

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

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。円の面積を S とすると、円が充填された場合に $N_p S = Ac_d$ が成り立つが、本手法では、円領域が重なるため、実質の円の充填として処理するために、 r の半分である $0.5r$ に置き換える。上記の手続きで生成した母点を図4に示す。

この母点から、ポロノイ図を計算する。ポロノイ図は、母点の位置関係により、ポロノイセルが持つ頂点数が変わるため、不均一な形状を生成するのに都合がよい。

以上の手続きにより、ポロノイセルの大きさを変えたポロノイ図を複数生成する。

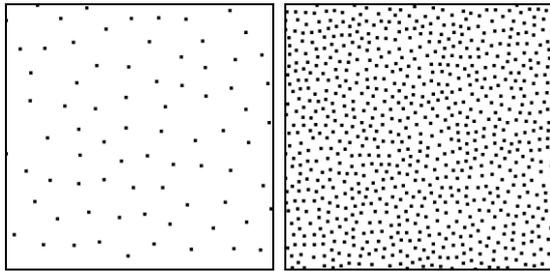


図4 Poisson-disk distributionで半径 r を制御した点群

3.2 岩石領域の選択

ポ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1つのグラフを生成する。3.1節では、セルの大きさが異なるポロノイ図を複数生成した。これらポロノイ図から、領域が重ならないようにセルを選択する。本手法では、重なり判定を画像にフラグを格納することで実装する。

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立てる。このとき、密な敷き詰めを可能にするために、領域が大きなポロノイ図のセルから順に選択する。また、指定した数、または指定した面積のセルを登録したとき、現在のポロノイセルの選択を終了する。擬似コードを図5に示す。

セルの選択では、一度選択したセルを二度と選択しないために、セルにインデックスを付与し、順に指定する。

以上の手続きで生成したグラフを図6に示す。図6(d)に示したグラフ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代入;

ポロノイ図ごとにセルの面積の平均を計算
面積でポロノイ図を降順にソート

全ポロノイ図に対して
  全ポ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;
        セル内の画素のフラグに有効を代入;
      }
    }
  }

```

図5 岩石のグラフ生成の擬似コード

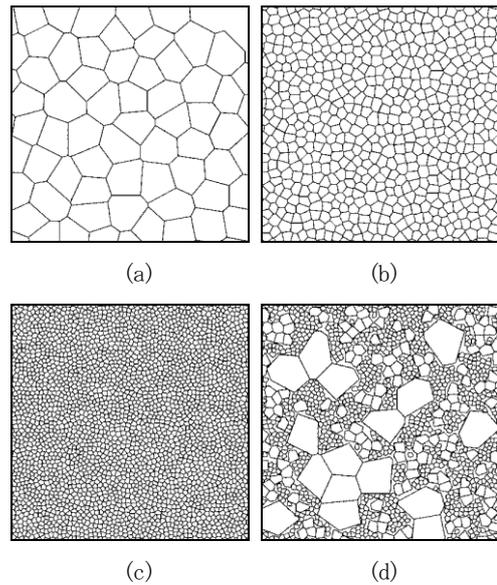


図6 3ポロノイ図から岩石のグラフを生成した例。
(a)から(c)のポロノイ図から(d)を生成した。

3.3 岩石形状の生成

3.2章で生成した岩石の領域から、不均一な岩石の3次元形状を生成する。図2に示すように、自然には欠けや割れた岩石が多数あり、様々な凹凸形状を表現する必要がある。図7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り、凹部が存在することがあり、これらが複合的に存在する場合が多い。



図7 岩石形状の縦断面例の模式図

本手法では、これら形状を表現するために、面を生成したのち、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。頂点 p_{add} の数は、対象のセルの頂点と同数とする。つづいて、頂点 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頂点 p_{add} を移動させ、岩石形状を生成する。式(2)は平面上の移動ベクトル t_{xy} を与え、式(3)は高さ方向の移動量 t_z を与える。

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

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

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ー、 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、 \mathbf{g}_{add} は頂点 p_{add} の重心、 r はPoisson-disk distributionの半径である。 t_{xy} と t_z を計算したのち、 p_{add} の平面上の座標に t_{xy} を加え、垂直方向に高さとして t_z を付加する。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8に図示する。

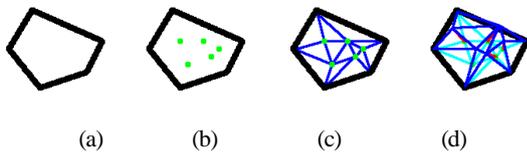


図8 岩石形状の生成

(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.

4. 結果と考察

本手法では、岩石の大きさと密度、形状の制御が可能である。岩石の大きさ制御した結果を図9に示す。それぞれポロノイ図の母点間の距離を変更して生成した。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変化させることができる。

ポ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10に示す。ここでは、3つのポ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9,3,1であり、ポロノイセルの数は100, 1000, 5000である。図10(a)は、diskの半径が9のポロノイ図が占める割合を領域の半分とした。diskの半径が3と1のポロノイ図は、それぞれ25%とした。同様に、図

10(b)と図10(c)は、diskの半径が3と1のポ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。

図11は岩石の形状を制御した結果を示したものである。図11(a)から図11(c)は、平面の移動である式(2)のパラメーターを変更した結果を示す。図11(a)は重心から離れるように、図11(b)は重心に収縮するように、図11(c)は、伸縮がランダムに決定するようにパラメーターを与えた。図11(d)から図11(f)は岩石の高さ方向の移動である式(3)のパラメーターを変更した結果を示す。図11(d)は岩石の高さが高くなるように、図11(e)は岩石の高さが低くなるように、図11(f)は岩石の高さがランダムに決定するようにパラメーターを与えた。これらのパラメーターに依存して、形状を制御できることがわかる。

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12に示す。

以上の生成例に対するパラメーターと計算時間を表1に示す。実験に用いたコンピューターは、Intel Core 2 Duo 2.66GHz CPUと2 GB メモリで構成されている。

本手法は、ポロノイ図を岩石のグラフとして用いた。これは、母点間の距離を制御することで、セルの大きさを制御できるためである。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る、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ポロノイ図を用いることは適切であると考えられる。

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10が示すように、表現ができていくことがわかる。均一性は、本手法のPoisson-disk distributionで十分であることから、均一性を高めるためのリラクゼーション[16]による点間の調整は不必要である。

また、岩石のグラフの生成時、グラフ選択の順序を大きな順とした。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ため、大きな順にした。そのため、大きさの異なるセルを混在させることができた。

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。不均一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、複数のポ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6(d)に大きさが異なるセル間に小さな隙間が見えるが、この現象に対して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を考慮していない。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擦や風化を表現していない。摩擦や風化の表現は、より写実的な岩石を生成するために、今後の課題とする。

本研究では、岩石のテクスチャは対象外であるが、岩石の表現として重要な要素である。岩石内の結晶の配置は不安定であるが、結晶自体の形状はモデル化されつつある[1] ため、不確定な要素を排除し、生成モデルを開発する必要がある。

5. まとめ

本論文は、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ポロノイ図を複数用意し、各ポロノイ図から指定した数、または、指定した面積分のポロノイセルを選択することで、大きさの異なるポロノイセルからグラフを生成する手法を考案した。このとき、ポロノイセルが重ならないように、排他的にポロノイセルを選択した。ポロノイ図の母点の配置はPoisson-disk distributionを用い、母点間の距離は、diskの半径を指定することで制御した。岩石の形状は、各ポロノイセル上に指定した数の頂点を追加し、ポロノイ頂点を含む近隣の頂点と三角メッシュ化することで形成した。

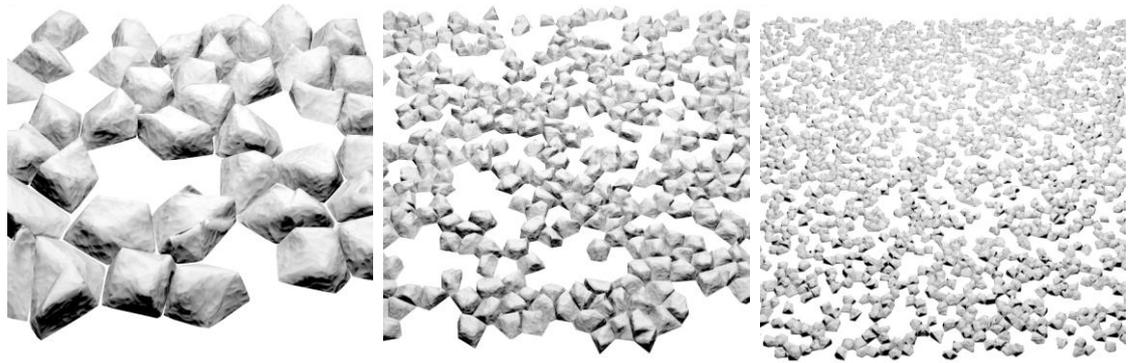
本提案手法は、地表に存在する多数の岩石に対して、手作業ではなくアルゴリズムで自動生成することで、幾何モデルデータの制作時間の削減になると考える。

参考文献

- [1] 松井, 坂野, ”岩石・鉱物の地球の科学”, 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, 1998
- [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”, Copmputer 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



(a)

(b)

(c)

図9 岩石の大きさを制御した例



(a)

(b)

(c)

図10 岩石の割合を制御した例



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

図11 岩石の形状を変化させた例



図12 生成した形状にテクスチャマッピングを施した例

表?1 生成のパラメーターと実行時間: 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)のパラメーター, c_{h1} から c_{h3} は式(3)のパラメーター, $time$ は実行時間. 複数のボロノイ図を生成するとき, 各パラメーターを縦に並べて示す.

	図1	図9(a)	図9 (b)	図9 (c)	図10 (a)	図10 (b)	図10 (c)	図11 (a)	図11 (b)	図11 (c)	図11 (d)	図11 (e)	図11 (f)
N	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1
r	9 3 1	9	3	1	9 3 1	9 3 1	9 3 1	9 9 9	9 9 9	9 9 9	9 9 9	9 9 9	9 9 9
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 0.1	0	0	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0.4	-0.4	0.2	0	0	0
c_{w2}	0.3 0.3 0.1	0	0	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0	0	0.4	0	0	0
c_{w3}	0.3 0.1 0.1	0	0	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0	0	0	0	0	0
c_{h1}	0.3 0.3 0.3	0.3	0.3	0.3	0.3 0.3 0.3	0.3 0.3 0.3	0.3 0.3 0.3	0.3	0.3	0.3	1.0	0.1	0.3
c_{h2}	0.3 0.3 0	0	0	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0	0	0	0	0	0.7
c_{h3}	0.1 0.1 0.1	0.1	0.1	0.1	0.1 0.1 0.1	0.1 0.1 0.1	0.1 0.1 0.1	0	0	0	0	0	0
$time$ (s)	5.57	0.21	1.88	4.53	4.39	4.18	5.27	0.12	0.10	0.07	0.11	0.08	0.07