

## 結晶釉のビジュアルシミュレーションのための拡張 DLA モデル

許 琪<sup>1</sup> 藤本 忠博<sup>2</sup> 村岡 一信<sup>3</sup> 千葉 則茂<sup>2</sup>

これまでのCGにおける陶芸の研究には、粘土のシミュレーション、練り込みの表現法、貫入（ひび割れ）の生成法、および釉薬の発色の表現法などがある。本研究では、釉薬の中においても、色彩のみならず、非常に興味深い結晶パターンを呈する結晶釉の表現法を試み、亜鉛結晶釉のビジュアルシミュレーション法を構築するための拡張 DLA モデルを提案する。

### Extended DLA Model for Visual Simulation of Crystal Glaze

Qi Xu<sup>1</sup>, Tadahiro Fujimoto<sup>2</sup>, Kazunobu Muraoka<sup>3</sup> and Norishige Chiba<sup>2</sup>

Up to now, the computer graphics (CG) techniques for representing ceramic arts have been studied from different aspects, such as particle-based visual simulation of virtual clay, the representation method of kneading, crack pattern simulation based on 3D surface cellular automata, the representation method of glaze coloring, and so on. In this paper, the representation method of crystal glaze based on extended DLA model is presented. The experiments on zinc crystal glaze are done. The results show that our method is effective for representing crystal glaze.

#### 1. はじめに

自然物・現象のビジュアルシミュレーションの興味深い応用の一つとして、創作的アミューズメントシステムがある。本研究は、感性活動、すなわち感性の遊び、感性の鍛錬、及び感性の表現へ3次元CGを導入する試みの一つとして陶芸のアミューズメントシステムの開発を目的とするものである。陶芸の魅力は、予期せぬ釉薬の発色など、完全に制御することの困難な現象が誘発する強制的な感性の高揚を伴う感性活動の対話性にあると思われる。これまで、CG

における陶芸の研究には、粘土のシミュレーション[1]、練り込みの表現法[2]、貫入（ひび割れ）の生成法[3]、および釉薬の発色の表現法[4]などがあるが、釉薬の中でも、色彩のみならず非常に興味深い結晶パターンを呈する結晶釉のシミュレーションに関する研究は見当たらない。

本論文は結晶釉の表現法の開発を目的として、拡張 DLA モデルによる亜鉛結晶釉のビジュアルシミュレーション手法を提案する。本手法は樹枝状パターンが形成される DLA モデルを基本としている。このモデルでは、分子のブラウン運動により樹枝状パターンが形成される。分子はブラウン運動しながら侵入するため、上に伸びだした枝がブラウン分子を取り込む確率がより大きく、ブラウン分子のパターン内部への侵入は妨げられる（遮へい効果）。この侵入と遮へいの競合により自己相似なパターンが形成

<sup>1</sup> 岩手大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Iwate University

<sup>2</sup> 岩手大学工学部  
Faculty of Engineering, Iwate University

<sup>3</sup> 東北工業大学  
Tohoku Institute of Technology

される．それで，ランダムに成長する凝集現象の原型となるこの DLA モデルに，結晶成長に重要な役割を果たす表面張力と結晶の特徴として異方性を加えることにより，樹枝状結晶パターンから針状，扇状結晶のパターンまで表現可能なシミュレーション法となっている．

## 2．結晶釉と結晶成長について

### 2.1 結晶釉

一般の釉は非晶質であるが，結晶釉は熔けた時の釉が結晶性の物質で飽和され，それが徐々に冷える際に析出して美しい模様を現す釉である．析出した結晶が微細な場合(ミクロ結晶質)はマット釉と呼ばれ，肉眼ではっきり認められるような釉は普通には結晶釉と呼ばれる．種類はチタン，コバルト，マンガン，亜鉛結晶などがある．結晶釉に亜鉛は重要な原料として用いられる．結晶釉の中でも特に大きな結晶を析出させることができるもののひとつとして，亜鉛結晶釉がある[5]．



図 1 亜鉛結晶釉の調和例



図 2 扇状結晶



図 3 針状結晶

図 1 に示すように亜鉛結晶釉は結晶の大きさや量は焼成後の冷却条件によって大きく左右される．図 2 と図 3 に示す例のように亜鉛結晶釉はケイ酸と化合して安定した扇状の結晶と針状の結晶を出す．

### 2.2 結晶成長

結晶は原子や分子が規則正しく並んでいる物質のことである．一般に結晶の成長は次の三つの段階を経て起こると考えてよい．先ず熱力学的に不安定な過飽和の状態が作られる．過飽和状態は物理状態(例えば温度，圧力，応力)の変化，化学反応により作ることができ，この不安定状態は結晶を析出することにより自由エネルギーの低い安定状態に移行しようとする．これが結晶成長の駆動力となる．第二の段階は小さな結晶の核ができる過程である．核はもとの系の中に均一にできたり，不純物，ごみ，容器の壁等にできたりする．第三の段階ではこの核の表面に原子，分子が規則正しく並び，その結果結晶成長が進む．

結晶の物理的性質が異方性であることは，結晶の本質的な特徴である．結晶方向による性質の差異または異方性は，結晶中の分子や原子の規則正しい充填の結果である．結晶中では図 4 に示すように原子が列をつかって規則的に並んでいる．

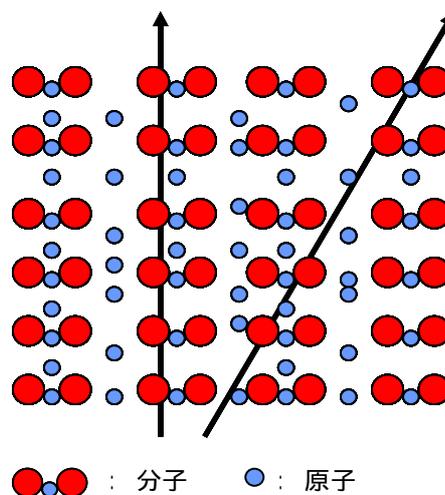


図 4 方向によって変わる結晶の性質  
結晶の中に入り込んで，ある一つの方向に，次

に別の方向に進む場合を想像してみよう．特別な2つの方向を選んだのでなければ，次々に会う構成原子または分子の間隔が異なる．原子，分子の配列が方向によって異なる，結晶のいろいろな性質もまた方向によって変わってく[6]．

結晶の成長速度が結晶面によって決まるときには，結晶の外形は結晶面の成長速度の相対的關係から決まる．図5のように ABCD の形をしている結晶で，面 AB に比べて面 BC の成長速度が早いときには，面 BC はどんどん成長して成長速度の遅い面が残る．このようなときには成長速度の遅い面が結晶の外形を支配する．

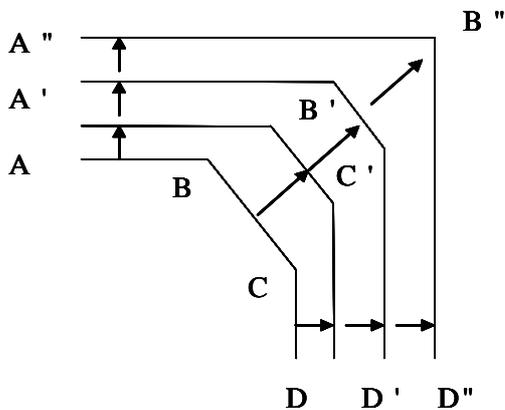


図5 結晶成長速度の大きい面と小さい面

### 3. 拡張 DLA モデルによる結晶成長モデル

#### 3.1 DLA モデル

DLA とは，拡散に支配された凝集 (Diffusion-Limited Aggregation の略)である．DLA 過程では，遠方からランダムに飛んでくる粒子が付着してクラスターを成長させる．ウィッテンとサンダー (T.A. Witten and L.M. Sander) は，ランダムに成長する凝集現象の原型となる DLA モデルを提唱した[7]．DLA モデルのアルゴリズムは以下のものである (図6参照)．

(a)発生:まず画面中心に一つの粒子を発生させる．中心から半径 Birthrad 離れた円周上の任意の位置に粒子が発生する．

(b)移動:発生した粒子は，半径  $dr$  の円周上任意

の点に移動する．移動した点からさらにまた同じ円周上の点に移動する事を繰り返す．

(c)固着:移動している粒子が固定している粒子に付着すると，その粒子は固定される．

(d)消滅:移動している粒子が一定以上 (Killrad) 離れると，その粒子は消滅する．それに従って，発生円・消滅円半径は粒子数に比例して増大して行く．

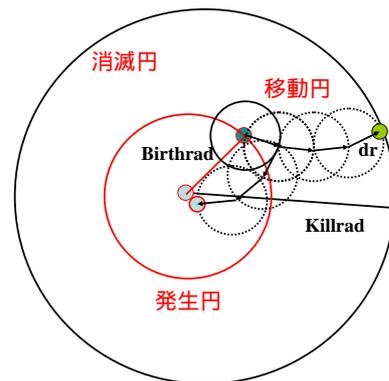


図6 DLA モデルのアルゴリズム説明図

DLA モデルの2D化と3D化の例は図7と図8に示す．DLA アルゴリズムのみを使用した時，確かに複雑な形は作られるのであるが，ランダム性の割合が非常に大きく，成長する形態の過程をコントロールすることが難しい．そこで，結晶成長の特徴を絡めてみる．

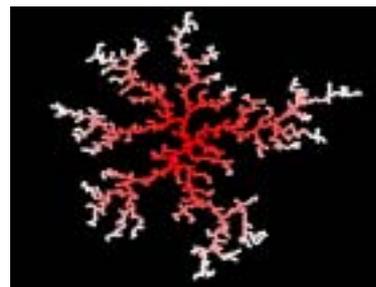


図7 DLA モデルの2D化の例



図8 DLA モデルの3D化の例

### 3.2 DLA 過程と結晶成長との比較 [8]

DLA 過程と結晶成長との違いを表 1 のように説明する。表面張力は、結晶成長の抑制と界面の安定化という 2 種類の作用をし、パターン形成に対して複雑な役割をする。一方、DLA 過程においてはこの表面張力の効果は無視されている。第 2 に考慮しなければならないのは結晶の異方性である。様々な方法によって異方性が取り入れられる。第 3 点は DLA 過程における「ゆらぎ」の効果である。成長過程が離散化されているため DLA クラスターには拡散粒子のランダムさが直接現れている。他方、結晶成長の場合には連続的にクラスターが成長する。

表 1 結晶成長と DLA 過程の比較

	表面張力	異方性	ゆらぎ	遮蔽効果
結晶成長	重要な役割:過飽和による成長の駆動力を弱め、界面の成長を安定化させる働きをする	結晶の異方性は異方性強度、異方性モード、角度からなる	連続的にクラスターが成長する	ある
DLA過程	無視されている	無視されている	拡散粒子のランダムさが直接現れている	ある

これら 3 種類の相違点はお互い複雑に絡みあって、得られるパターンに影響を及ぼす。

### 3.3 「ゆらぎ」と異方性との競合

DLA 過程の「ゆらぎ」を抑えて異方性の効果を浮かび上がらせると、樹枝状から針状、扇状のパターンへ形成されることはいくつかの試みによって明らかにされている。

結晶成長に關与するパラメータ  $D$  は固-液界面を隔てる内部遷移層の厚さを示し、値は式(2)によって決まる。

$$D = A + B * \cos ( J * ) \quad ( 2 )$$

$D$ : 固 液界面を隔てる内部遷移層の厚さ

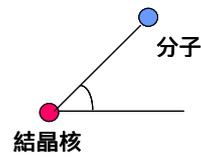
$A, B$ : 異方性の強さ

$J$ : 異方性のモード

: 核を中心とした極座標  $( r, )$ , 粒子と

結晶核のなす角度, 図 9 のように示す。

図 9 粒子と結晶核のなす角度



結晶成長の異方性は、異方性の強度  $A, B$ , 異方性のモード  $J$ , 核を中心とした極座標で粒子と結晶核のなす角度で表現する。パラメータを調整することによって、樹枝状から針状、扇状のパターンへ変遷していく様子が見られる。表面張力はここでは、考慮していない。

### 4. レンダリング

結晶部分は、屈折率が異なることにより可視化されると考えられるので、レイトレーシング法により、以下のような結晶軸のパターンの描画を試みている。DLA モデルで得られた 2 値パターンに平滑化処理を行いグレースケールパターンに変換する。それを結晶部分の“厚さ”として、周囲にガラス性の釉薬が存在すると仮定してレンダリングを行うことを考えている。

### 5. シミュレーション手順と生成例

シミュレーション手順は以下のものである。

(1) 初期状態の設定：過飽和の状態を仮定に基づく。

(2) 一つ結晶パターンを考えると 図 10 に示すように最初一つの臨界核において、一定の接触判定を行っている。また、原子と原子との接触は無視する。

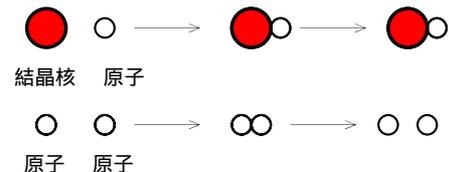


図 10 臨界核をつくる

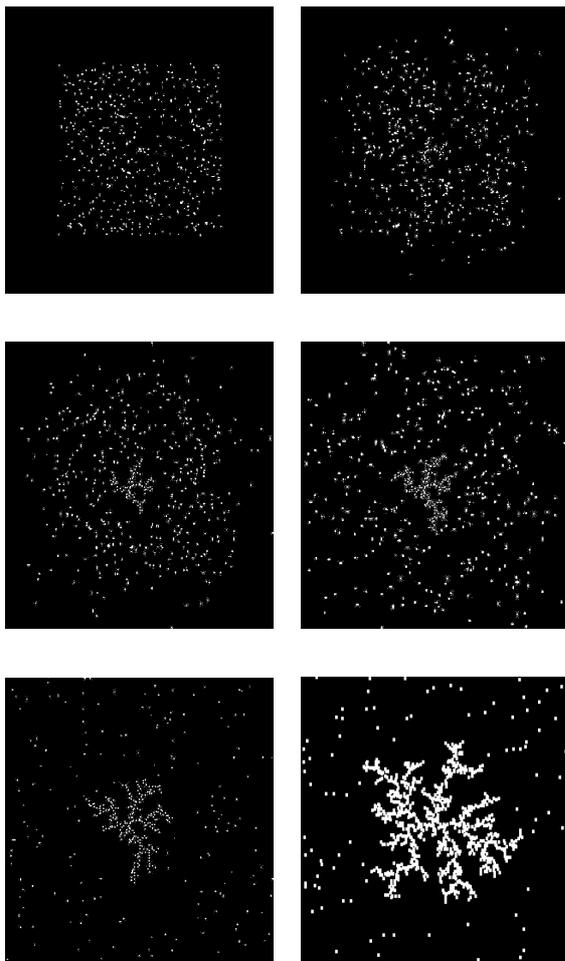
分子のブラウン運動により樹枝状 DLA モデルは形成される．結晶核の周りにブラウン運動している複数の分子を置く．分子はブラウン運動しながら侵入するため，上に伸びだした枝がブラウン分子を取り込む確率がより大きく，ブラウン分子のパターン内部への侵入は妨げられる(遮へい効果)．この侵入と遮へいの競合により

自己相似なパターンが形成される．

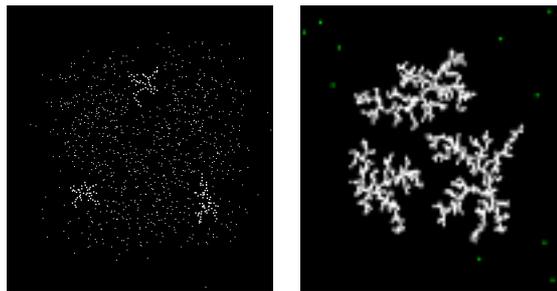
(3) 結晶の異方性を加えて計算する．

(4) 結晶の外形を決める．

本手法で提案する拡張 DLA モデルに基づいて結晶成長のシミュレーションを行った結果を図 11 ~ 図 13 に示すように樹枝状結晶モデルから針状結晶モデル，扇状モデルへ変遷していくことがわかる．



(a) 一個の結晶核



(b) 三個の結晶核

図 11 樹枝状結晶モデル A=1.0 B=0.0

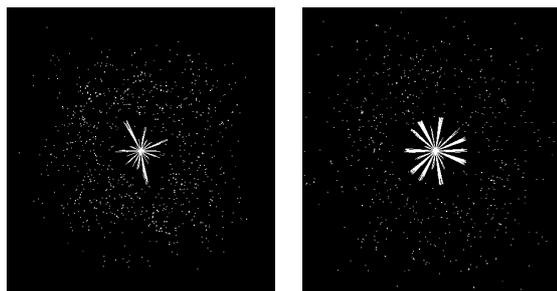
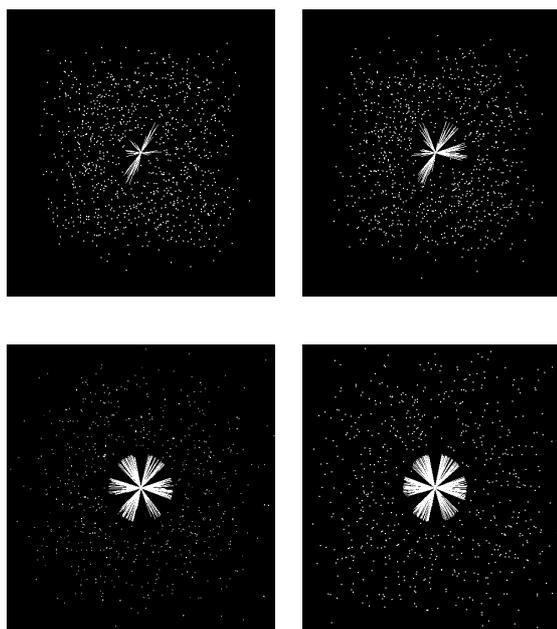
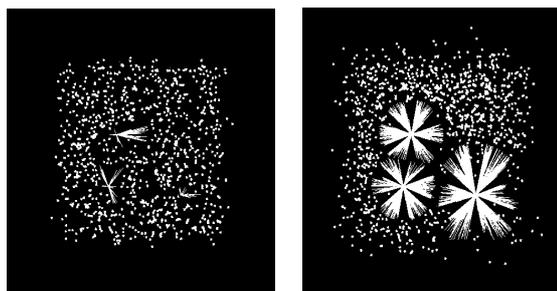


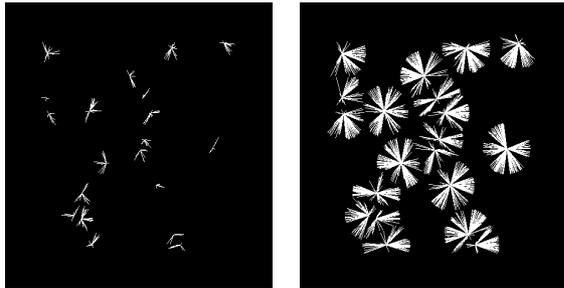
図 12 針状結晶モデル A=0.0 B=3.0 J=18.0



(a) 一個の結晶核



(b) 三個の結晶核



(c) ランダムに分布する結晶核

図 13 扇状結晶成長のモデル  $A=1.05$   $B=1.5$

$J=6.0$



図 14 実際の陶芸

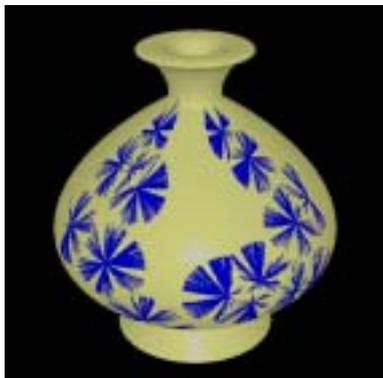


図 15 シミュレーションの例

## 6. まとめ

本手法では、ランダムに成長する凝集現象の原型となる DLA モデルに、結晶の特徴としての異方性を考慮することにより、樹枝状結晶パターンから針状、扇状結晶のパターンへ変遷していくシミュレーションを可能としている。

現在、レンダリング法を改良することと、DLA モデルをさらに拡張することにより、より酷似した結晶成長パターンの表現が得られるのではないかと考え検討を行っている。また、種々の釉薬によるパターンや色彩分布の生成法を開発し、粘土などの他の研究成果と融合させ、陶芸の創作的な VR システムを開発することが長期的な課題である。

## 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] 小田, 村岡, 千葉: 仮想粘土の粒子ベースビジュアルシミュレーション, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.5 pp.1142-1150 (2001).
- [2] 佐々木: CG による練り込み技法の表現, 情報処理学会研究報告, Vol.92, No.63, 92-CG-58, pp.45-52 (1992).
- [3] 千葉, 海野, 和田, 村岡: ひび割れの行動モデルとその CG への応用, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J73-DII, No.10, pp.1742-1750 (1990).
- [4] 川瀬, 西関, 千葉: 陶芸の CG に向けた基礎的検討, 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.94, No.7, pp.11-18 (1994).
- [5] 宮川: 陶磁器釉薬, pp.165-170, 共立出版株式会社(1991).
- [6] 万波: 結晶学, pp.128-144, 誠文堂新光社 (1972).
- [7] T.A. Witten and L.M. Sander, Phys. Rev. Lett., B27(1983), 5686.
- [8] L.M. Sander, Nature, 322(1986), 789.
- [9] T. Vicsek, Phys. Rev. Lett., 53(1984), 2281.