

## 蟻の群知能モデルの自然物・現象モデリングへの応用

尹 新\* 藤本 忠博† 千葉 則茂†

\* 立命館大学 † 岩手大学

### アブストラクト:

蟻の群れのモデルが、仮想的なフェロモンを通じてほかの蟻と情報交換することによって、知的な振る舞いを実現することが示されている。これは、蟻の群知能と呼ばれている。一方、この蟻の群れのモデルで生成される歩行ルートには、自然物や自然現象のパターンを連想させるものが存在する。筆者等は、3次元空間の中に、蟻の巣と餌を設定し、蟻たちがフェロモンに従って行動するという基本的なモデルにおいて、いくつかの自然物や自然現象を取りあげ、そのパターンに類似したルートが生成されるようなフェロモンの与え方について基礎的な検討を行っている。本論文では、樹木形状、火山形状、稲妻形状などに類似したパターンを生成するためのモデルの詳細とそれによるパターン生成例を示し、応用の可能性を示す。

## Application of Ant Colony Optimization for Modeling Natural Object and Phenomena

Xin Yin\* Tadahiro Fujimoto† Norishige Chiba†

\* Ritsumeikan University †Iwate University

### Abstract:

It is known that some kinds of intelligent behavior can be realized by utilizing a model of an ant colony in which ants act by exchanging information with one another via virtual pheromone. This model is called ant colony model or ant colony optimization. The ant colony model often makes the ants generate routes that look like patterns similar to some natural objects and phenomena. So, using this model, we have developed and examined a basic model for producing some natural objects and phenomena. In our model, first, a nest and some places of food are set in the 3D space. Then, ants act along some routes according to the pheromone that has been put on the routes by preceding ants. By appropriately setting the nest, food places, and ways of pheromone exchange, the resulting route pattern gets similar to some natural objects and phenomena. In this paper, we present detailed models that generate some natural patterns such as tree, volcano, and lightning, and show some generated examples. Then, we also mention the possibility of the application of our model.

### 1. まえがき

これまで、コンピュータグラフィックス(CG)の研究分野において、自然物と自然現象のモデリングに関する研究が活発に行なわれてきている。自然物の形状には複雑なものが多く、また自然現象の発生・進展メカニズムには解明されていないものも多い。本研究では、蟻の群知能モデルを用いたシンプルな手法について検討を行った。自然物・自然現象のモデリング手法として、物理ベースシミュレーションのように自然物・自然現象の形成メカニズムに基づいて構成しようとするアプローチと、フラクタルベースモデリングのようにその現象面から模倣しようとするシンプルな数理的アプローチが挙げられる。

例えば、前者の例としては、以下のようなものが挙げられる。Chibaら[1]は、向日性など

の生長の制御機能を考慮した自然な揺らぎを含む樹木のモデリング手法を提案した。また、伊藤ら[2]は柱状節理の形成メカニズムに基づいて岩場形状を表現した。Stam[3]と小田ら[4]は、物理ベースのアプローチで、流体の運動を表現した。Dobashiら[5]は、風の影響を考慮したセルオートマトン法で、雲の発生・消失と流れを表現した。ソソラバラムら[6]は、稲妻の発生メカニズムに基づいて、より少ない計算量でさまざまな稲妻のパターンを生成した。

後者のアプローチには、リアリティはやや劣るものの、自然物や自然現象を表現するための汎用的なツールを提供しようとするものが多い。例えば、Mandelbrot[7]が提唱したフラクタル幾何学は、自然界には、部分形状と全体の形状が相似の関係にあるものが多いという特

徴に着目したものであり、この幾何学に基づいたいくつかの手法が提案されてきた。Miller[8]は、フラクタル幾何により山のモデリング手法を提案した。K. Perlin[9]は、 $1/f^\beta$ ノイズのようなフラクタル的な性質を持つノイズの生成法を提案し、それに基づき種々の揺らぎパターンを生成した。Otaら[10]は、 $1/f^\beta$ ノイズを用いた樹木の枝葉の風による揺らぎ運動の生成手法を提案した。

自然物や現象がつくるパターンは(局所)最適化の連続により形成されていると考えられる。例えば、樹木は、太陽光や養分を効果的に獲得するために、それぞれの時点で、最適な方向に向かって生長している。このため、最適化アルゴリズムにより自然な形状パターンを得ることが可能であると考えられる。本論文では、蟻の群知能モデルにより、自然物や自然現象のパターン生成について検討を行った結果について報告する。

本論文の構成は次のようである。まず、第2章で、蟻の群知能アルゴリズムを紹介する。次に、第3章で、蟻の群知能アルゴリズムのパターン生成への応用として具体的に検討した手法について述べる。また、それによるパターン生成例を示す。最後に、第4章で、まとめとこれからの課題について述べる。

## 2. 蟻の群知能

最近、人工生命などの研究分野で、蟻の群知能のアルゴリズムが提案されている。蟻の群知能のアルゴリズムの大きな特徴は、蟻の発散したフェロモンに注目することである。このフェロモンを利用し、さまざま情報を伝え、高い知能が得られる。蟻が通過したところに発散したフェロモンを付ける。そして、次の蟻がこのフェロモンの量の分布に従って行動する。これは、蟻の群知能の基本的な考え方である。この簡単な手法で、蟻は環境の変化に適応し、行動コースをうまく変え、餌を探す。最初の蟻の群知能アルゴリズムは、Drigo[11]により提案された。

蟻の群知能のアルゴリズムの一つの応用例として巡回セールスマン問題が挙げられる。ここでは、群知能アルゴリズムの理解のため、この巡回セールスマン問題の最適なコースを蟻の群知能アルゴリズムにより探す手法を説明する。

都市の総数を $n$ 、蟻の総数を $m$ とする。また、 $N_i^k$ は第 $k$ 番目の蟻が都市 $i$ から行くことが可能

な都市の集合である。このとき、式(1)で、 $\forall j \in N_i^k$ に対して、第 $k$ 番目の蟻が都市 $i$ から都市 $j$ に行く確率 $p_{ij}^k$ を表す。

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha (\eta_{il})^\beta} \quad (1)$$

ここで、 $\tau_{ij}$ は都市 $i$ と都市 $j$ の間の経路のフェロモン量であり、 $\eta_{ij}$ は都市 $i$ と都市 $j$ の間の距離の逆数である。 $\alpha$ と $\beta$ はフェロモンと距離のそれぞれの影響を考慮するためのパラメータである。この式により、蟻はフェロモン量が高い経路および距離が短い経路を優先的に選択し、行動する。

また、式(2)は蟻が都市に付けたフェロモンである。

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L^k(t) & \text{if } (i, j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{if } (i, j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $Q$ は定数であり、 $L^k$ は蟻 $k$ が通過したコースの長さの合計である。また、 $T^k$ はこの通過したコースの辺の集合である。この式は、蟻が都市に付けたフェロモンは経過したコースの長さの逆数であることを示している。

蟻のフェロモンの変化と共に、都市のフェロモンも変化する。下の式は、新しい都市のフェロモンを示す。

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (3)$$

$\rho$ は都市のフェロモンの粘り強さを示す。 $\rho$ が高いと、フェロモンの蒸発量が低い。この式は、都市のフェロモンが蒸発と新しい蟻の通過により更新されることを意味する。このように式(1)、(2)、(3)により、蟻が都市の間を探索し、巡回セールスマン問題の最適なコースを探していく。

以上のアルゴリズムが最初に提案された蟻の群知能アルゴリズムである。そして、その後、幾つか新しいアルゴリズムが提案されている(Bullnheimer[12], Stützle[13])。その基本的な改良点は、フェロモンの更新法や、蟻の種類によって役割分担することなどである。これらの改良によって、さまざまな問題点が解決され、アルゴリズムの効率が向上した。

探索時間と探索範囲はトレードオフの関係にある。探索時間が短ければ、探索範囲は狭く、最適な解が得られる可能性が低くなる。一方、

探索範囲が広げれば、探索時間は長いですが、最適な解が得られる可能性が高くなる。このため、探索時間と探索範囲の間のバランスを取ることが重要である。このバランスをコントロールするため、Nakamichi [14]は、効率的なアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムでは、蟻が次の都市に行くときに、一部の蟻がランダムに選択して行く。結果としては、効率性が大幅に改良した。その原因は、一部のランダムな選択により蟻の活動（探索）範囲が拡大し、正解のコースを探すことが容易になるためであると考えられる。また、ランダム選択を加えたアルゴリズムで生成されたコースは自然に見える。これは、実際の動物の行動コースと似ているためと考えられる。

ここで、2次元の空間で、蟻が餌を探すおよび餌を巣に運ぶことにより、蟻の群知能のアルゴリズムの効果を示しておく。図1の(a)に示す小さい灰色の点は都市であり、三角形の点は蟻の巣である。また、大きな丸い点は餌である。そして、大きい四角の黒い点が巣に集まる蟻である。最初は、図1の(b)に示したように、蟻が巣から出発し、餌を探す。このとき、蟻が都市に巣のフェロモンを発散し、餌のフェロモンに従って行動する。しかし、このとき、都市の上に餌のフェロモンがないため、蟻がランダムに行動する。そして、蟻が餌を発見した後、餌を取って、巣に戻る。このとき、蟻が都市に餌のフェロモンを発散し、巣のフェロモンに従って

行動する。このとき、都市の上に巣のフェロモンがあるため、蟻は速やかに巣に戻ることができる。蟻が巣に戻った後、また、餌を取りに行く。以上の過程を繰り返すことによって、巣と餌の間に蟻の行動コースが生成される。図1の(c)に示したのは、部分的に蟻が巣と餌の間のコースに従って行動している場合である。また、ほかの蟻が餌を探しているため、コースから離れ、ランダムに行動する。このとき、餌を探している蟻が餌のフェロモンを発見すれば、餌のフェロモンに従って速やかに餌を取ることができる。最後に、図1の(d)に示したように、すべての蟻が巣と餌の間の安定したコースに従って行動する。

図1の(e)に示したように、一度生成された巣と餌の間のコースが障害物で遮断されるとする。すると、図1の(f)に示したように、コースを遮断された初期には、蟻の行動が一時的に混乱を起こす。そのあと、図1の(g)に示したように、同じアルゴリズムを繰り返すことで、初期の新たな巣と餌の間のコースが生成される。そして、そのコースが少しずつ変更され、最後に、図1の(h)に示したように、安定した新たなコースを生成することができる。

以上に述べたように、蟻が環境の変化に適応して、自らの行動を決定する。これが蟻の群知能と呼ばれるものである。また、生成した行動コースは、ランダムさを含むため、自然な印象を与えるものとなる。以下、この蟻の群知能の

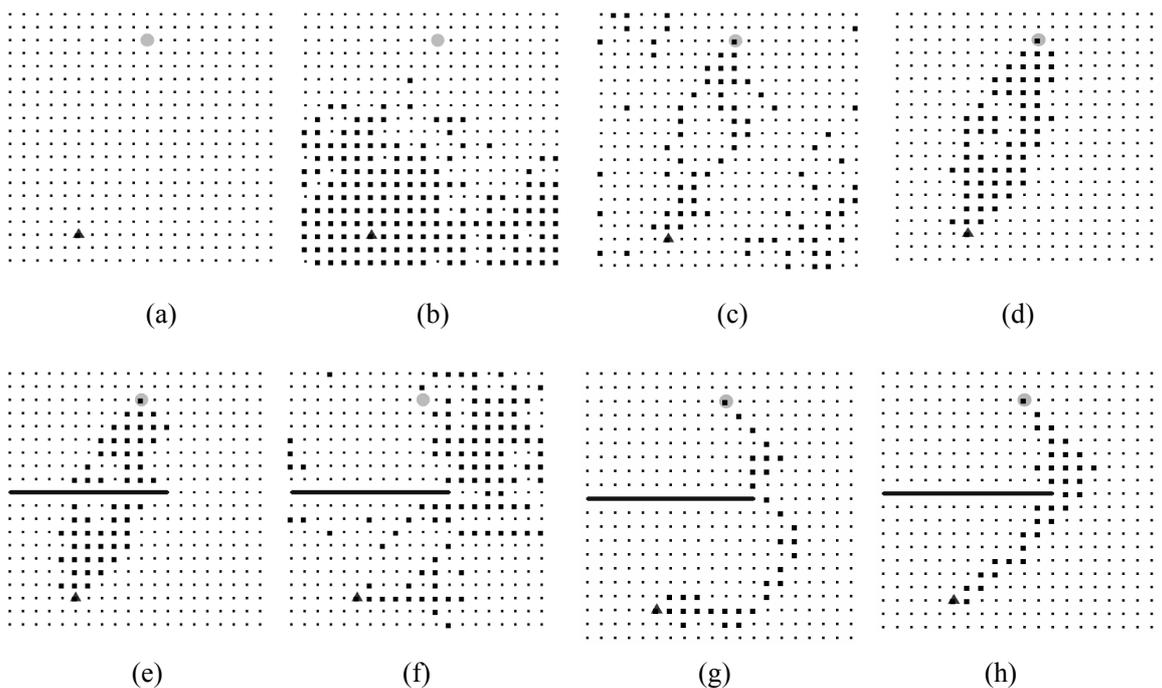


図1： 蟻の群知能のアルゴリズム。

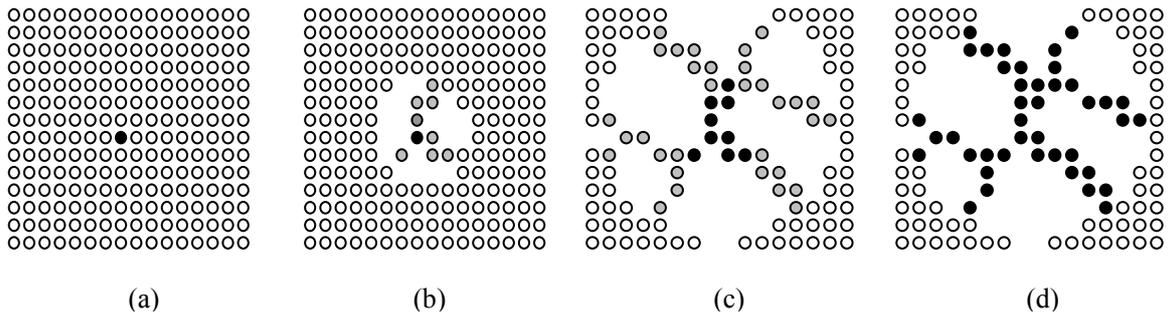


図 2 : 基本的なパターンの生成

アルゴリズムを用いた, 自然物や自然現象のモデリングの例を示す.

### 3. 自然物・現象のモデル化の例

自然界には, 多くの“最適化”が存在している. ここで, 蟻の群知能のアルゴリズム(以下, ACO と呼ぶ) による最短コースの生成モデルを中心に述べる.

蟻が都市にフェロモンをつけるときに, フェロモンの付け方によって, さまざまなパターンを生成できる. 式 (1) には,  $\eta_{ij}$  は都市  $i$  と都市  $j$  の間の距離と関係があり, 蟻は短いコースを選んで行動する. この  $\eta_{ij}$  を変えることにより別のコース選択を実現することができる. このため,  $\eta_{ij}$  を異なった物理変数に設定することによって, 様々なパターンを生成することができる. Yin ら [15] は, ACO を用いて生物による木材の経年変化現象を表現した. ここでは, ACO の手法によるその他の, 自然物や自然現象の表現法について述べる.

図 2 には, 基本的なパターンの生成法を示している. 図 2 の (a) には, 初期の模様を示している. 中心の黒い点は, 蟻の巣である. 周りの点は餌である. 図 2 の (b) には, 蟻が巣から出発し, 餌を食べていく. 蟻が餌を食べることと共に, 巣の周りの餌がなくなっている. それから, 巣と周りの間に, ACO による, 蟻が安定しているコースに従って行動する. そして, 図 2 の (c) に示すように, このとき, 生成したコースを新しい蟻の巣として固定される. 蟻がこの新しい巣から, 新しい安定したコース (灰色の点) に従って周りの餌を食べて行く. 図 2 の (d) に示したのは, 新しい安定したコースを蟻の巣として固定する. このように, 以上の過程を繰り返すことにより, 2次元の枝状のパターンが成長していく.

まず, 火山のモデリング法について説明する.

火山形状は溶岩流により生成される. 火山の周りの位置が中心より低いいため, 溶岩が中心から周囲に流れるようになっている. このため, 図 3 の (a) に示すように, 最初の蟻の巣を中央の円に設定する. そして, ほかの周りの都市を餌に設定する. また, 2次元空間の設定については, 正三角形のメッシュにより構成している. 都市の位置は, その三角形の端点の位置とする. そして, 上で説明した基本的なパターンの生成法で火山のパターンを生成する. 図 3 の (a) から図 3 の (d) まで, 2次元の枝状のパターンが成長していく様子に示している. 蟻が餌を食べるとき, 中心に近い餌を先に食べる, 残した餌が周囲に分布している. このため, 生成したパターンが中心から周囲に延びようになっている. これが溶岩の中心から周囲の低いところに流すことと類似している. 最後に, この生成したパターンで次のように火山を構成する. 実際に, パターンを生成したときに各部分の生成した時間が異なる. 中心のパターンの生成時間が早い, 周囲のパターンの生成時間が遅い. この時間の違いを火山の高さに設定すれば, 3次元のパターンが構成される. そして, このパターンの黒い線の周りの三角形メッシュの高さがこの黒い線の高さより低いように設定することによって, 火山を表す表面三角メッシュを構成される. 図 3 の (e) と図 3 の (f) には, 異なる視点から見た火山の模様を示している.

火山の生成と類似し, ここで, 3次元空間での樹木の生成法を述べる. まず, 均一性が良い球の最密充填構造で3次元空間を分割する. その球の中心位置に都市に設定する. そして, 一番下の層の中央点を最初の巣に設定する. 餌の設定は下から幾つか層の以外の都市に設定する. そして, 蟻が ACO に従って行動する. 今回の蟻が行動するとき, 式 (1) の  $\tau_{ij}$  と  $\eta_{ij}$  の以外に, 次の式に示すように, 重力の影響を表

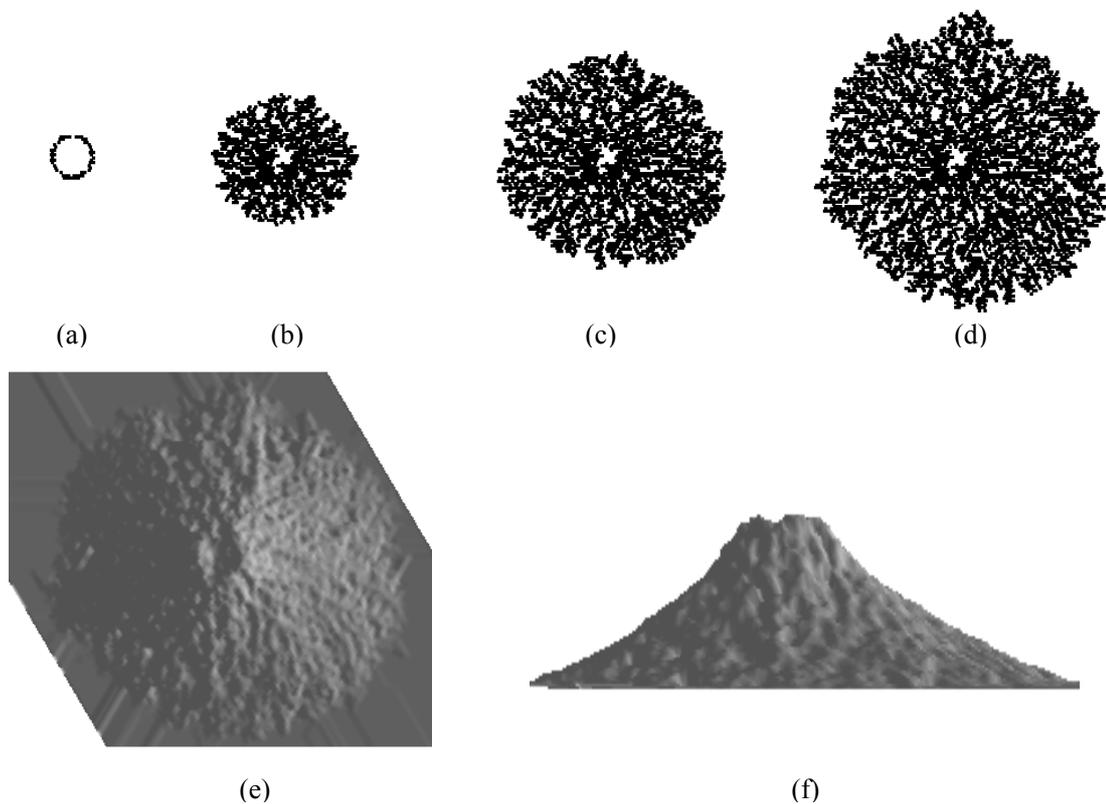


図3：火山のモデリング

す変数  $v_{ij}$  を追加する.

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha (\eta_{ij})^\beta (v_{ij})^\gamma}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha (\eta_{il})^\beta (v_{il})^\gamma} \quad (4)$$

この式の変数が  $v_{ij}$  の以外に、式 (1) と同じである。  $v_{ij}$  の大きさについては、高い都市の  $v_{ij}$  が低い都市の  $v_{ij}$  より大きい。結果としては、木の生長が上の栄養（空気や光など）を取るために成長していく。また、火山のパターンの生成と同じように、蟻が周りの餌を食べることによって生成した安定したコースを固定することを繰り返すことで、木が成長していく。図4の (a) には一部の木を生成した結果を示している。黒い点は、生成した木であり、灰色点は、巣と餌の間に行動している蟻である。図4の (b) には、生成した点群で構成している木のパターンを示している。最後に、この点群から枝の始点と終点を抽出し、それぞれの枝を円柱体で表示した結果を図4の (c) に示している。

稲妻は、火山、木と同じ、最短コースに従って、発生する。今回の実験対象としては、雲と地面の間に発生する稲妻にする。このとき、稲妻の発生は、雲から地面に向い、成長していく。

このため、巣の最初の位置は、一番上の層の中央点に設定する。また、地面として、餌が一番下の層のいくつか点に設定する。図5の (a) には、その初期の状況を示している。蟻が巣から出発し餌を探す。そして、餌を巣に運び、蟻が巣に戻るとき、巣が蟻の戻す方向に成長していく。このように、巣が上の雲の位置から、下の地面に向いて成長する。最後に、巣が地面と接触する。このときの巣の形が、最後の稲妻の形となる。図5の (b) には、点群で稲妻の形を表現している。そして、雲から地面につながるコースを太い線で表現し、ほかのコースを細い線で表現する。図5の (c) に示すように、稲妻の形を表現することができる。

本章では、ACO を用いて、火山、木、稲妻などを表現した。これらの自然物や現象の共通点は最短コースで構成していることである。巣と餌を設定する方法や、巣の成長のタイミングを調整することで、様々な自然物や自然現象の表現が可能となることが期待できる。

#### 4. まとめ

本論文では、ACO を用いた自然物や自然現象のモデリング法を提案し、実験結果により、そ

の適用可能性を示した。

将来の課題については、最短コース以外の自然物や自然現象のモデリング法の開発、動物の群れの行動などへの適用を試みることや、点群データのレンダリング法の開発が挙げられる。また、ACOモデルと、実現象のメカニズムとの関係づけ、実現象のメカニズムをより強く反映したACOモデルの開発などが挙げられる。

参考文献：

[1] N.Chiba, S.Ohkawa, K.Muraoka and M.Miura. Visual Simulation of Botanical Trees Based on Virtual Heliotropism and Dormancy Break, The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol.5, No.1, pp.3-15, 1994.  
[2] 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, 2003.  
[3] J. Stam. Stable Fluids, *Proc. of SIGGRAPH'99*, pp.121-128. 1999.  
[4] 小田 泰行, 村岡 一信, 千葉 則茂. 溶岩流の粒子ベース・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.51-60, 2003.  
[5] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, T. Nishita. A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds, *Proc. of SIGGRAPH'2000*, pp.19-28, 2000.  
[6] ソソラバラム バトゥジャルガル, 藤本 忠博,

村岡 一信, 千葉 則茂. 電界を考慮した稲妻のCGモデル, 画像電子学会誌, Vol. 32, No. 1, pp. 64-69, 2002.

[7] Benoit B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Co., New York, 1982.  
[8] Gavin S. P. Miller. The Definition and Rendering of Terrain Maps. *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp.39-48, 1986.  
[9] K. Perlin. An Image Synthesizer, *Computer Graphic's*, Vol. 19, No. 3, pp. 287-296, July, 1985.  
[10] S.Ota, M.Tamura, T.Fujimoto, K.Muraoka, N.Chiba. A Hybrid Method for Real-Time Animation of Trees Swaying in Wind Fields, *The Visual Computer*, Vol.20, No.10, pp.613-623, 2004.  
[11] M.Drigo, V.Maniezzo and A.Colomi. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, Vol.26, No.1, pp.1-13, 1996.  
[12] B.Bullnheimer, R.F.Hartl and C.Strauss. A new rank-based version of the ant system: a computational study. *Central European Journal of Operations Research*, Vol.7, No.1, pp.25-38, 1999.  
[13] T.Stützle, and H.H.Hoos. MAX-MIN ant system. *Future Generation Computer Systems*, Vol.16, pp.889-914, 2000.  
[14] Y.Nakamichi, T.Arita. Diversity control in ant colony optimization. *Artif Life Robotics*, Vol.7, No.4, pp.198-204, 2004.  
[15] X.Yin, T.Fujimoto, N.Chiba, Visual Simulation of Wood Aging Caused by Biological Deterioration, *NICOGRAPH International2005*, pp.49-54, 2005.

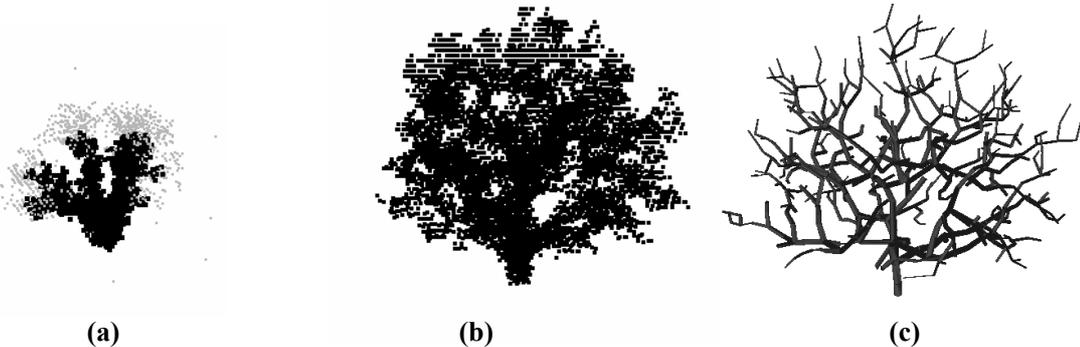


図4：木のモデリング

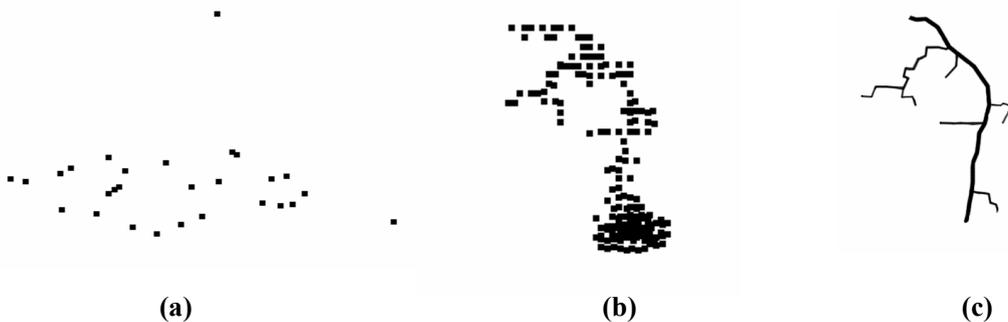


図5：稲妻のモデリング