自然物・現象のCGシミュレーション*

千葉 則 茂**

CG Simulation of Natural Objects and Phenomena

Norishige CHIBA

1. はじめに

自然物や現象を対象としたコンピュータグラフィックス(CG)の研究が近年急速に盛んになってきた。これは、その実用性のみならず、形の科学という観点からも興味深く、コンピュータで味わいのある「自然」の表現ができそうだという、自然がもつ神秘性への挑戦意欲も手伝ってのことであると思われる。

自然物・現象のCGによる写実的な表現には将来を含め以下のような種々の応用分野が考えられる。

- (1) 種々の建設計画における景観予想・評価のための景観シミュレーション
- (2) フライトシミュレーションやドライビングシミュレーションのための景観の生成
- (3) 映画の特撮, CG アクタ
- (4) CG 庭園, CG 植物園, CG 動物園
- (5) CAI, CG インストラクタ
- (6) 形の研究

.....

(1), (2)では、季節や気象の違いによるシミュレーションも可能となる。(2), (3)の技術はゲームにも使える。(3)では、架空の山岳地形、植物、動物も登場する。CG 馬やCG 雑兵による合戦シーンも可能となる。城は何度でも気に入るまで炎上させることができる。CG アクタの試みは演劇への登場という形でもすでになされている。(4)では、すでに絶滅した植物や動物に会える。また、飼育

や栽培が困難であるとか、非常に危険であるとかの動植物にも身近に会える。狭いマンションや宇宙船のなかでも広い庭園を散歩できる。(5)では、動物の飼育法やつきあい方を学ぶことができる。CG 盆栽, CG 生け花による技術の鍛錬も可能となる。もちろん、景観設計を学ぶこともできる。いずれにおいても、親切的なCG インストラクタが相談にのってくれる。(6)では、CG による形状シミュレーションにより、形成メカニズムの解明が加速される。

このような自然物・現象のCGによるシミュレーションの両極端には、手書きの絵・アニメーションと実物そのものが位置する。この辺が、いわゆる物理量の正確な“推定”を目的とする通常のシミュレーションとは異なる点である。すなわち極端に言えば、研究の出発点は手書きの絵やアニメーションにあり、目的は正確な推定ではなく、視覚的な印象の酷似した表現を可能とするお絵描き手法の開発にあるのである。そのため、対象それぞれに関連するところの学問分野の研究者からはお叱りを受けるような稚拙な手法も多々存在するものと思われる。しかしながら、ほとんどの場合、特に実際と酷似した形や色彩を生成するためにそのままアルゴリズムとして使えるようなメカニズムが解明されている例が少ないのも事実であり、CG 研究者の立場でそれぞれの対象を研究する必要性が十分にある。また、関連する知見が多く得られている分野でも、もともと目的が異なるため、アルゴリズムとしてモデル化されていないことも多い。さらに、楽観的な見方を許していたければ、実際と酷似する“みてくれ”が生成で

*原稿受付 1993年3月4日

**岩手大学工学部

きるモデルであるならば、そのモデルは自然のなんらかの本質をとらえていることが期待できる。

本稿では、筆者が行ってきている山岳、樹木、山岳・樹木の季節感、樹木の揺らぎ、炎・煙、水流、および貫入に関するシミュレーション手法の開発について、特にその成果である画像を示し、この分野の紹介とさせていただく。これらの手法が扱っている問題は大きく、アルゴリズムのレベルまで解説することはできないので、興味を持たれた読者は、ぜひ原論文や文献^{1)~3)}を参照していただきたい。これらの文献では、この分野の研究動向が詳細に報告されている。

2. 山岳形状のシミュレーション

これまでに提案されている架空の山岳形状の生成法としては、フラクタル手法に基づき、等方的に標高値の変動する地形を生成するもの（文献^{4)~9)}など多数）と、山岳の形成メカニズムを考慮し尾根線の明確な地形を生成しようというもの^{7)~9)}がある。これらはいずれも、自然な架空の山をわずかな入力データにより自動生成しようという手法である。フラクタル手法は簡便であり、意外性のある山岳形状を生成するのに向くが、尾根線や谷線をもつような山岳形状の生成は期待できない。尾根線・谷線をもつ山岳形状の生成を目的とした手法には、侵食による山岳の形成シミュレ-

ーションを水系の生成により近似的に行うものやフラクタル手法による山岳地形に、浸食や風化作用による変形を施し、より自然な山岳地形を得ようというものなどがある。

筆者らの定義法¹⁰⁾は、期待する山岳の概形を表すような尾根線を入力するだけで、詳細な尾根線を再帰的に生成することにより、尾根線の明確な山岳地形を自動生成するというものである。これは、ある侵食段階の山岳地形が与えられたとすれば、次の段階で生じるより詳細な尾根線は、その地形の谷部に向かって流れる水流方向にできるという自然な考えに基づいている。本手法では、期待する山岳地形の概形は大まかな尾根線で指定するため形状のイメージと制御が容易であり、形状の生成は尾根線単位で行うため侵食作用を素朴にシミュレーションするより高速であるという特徴をもつ。

図1に生成例を示す。上段左の写真が入力の主尾根線であり、上段右のものが最終的に得られた尾根線である。下段が結果の尾根線で得られた山岳形状である。図2に、この山岳形状を用いて作成したCG画像の例を示す。

今後の課題としては、やはりフラクタル手法のみでは生成が困難であるような桂林やグランドキャニオンのような地形の生成が興味深い。

3. 樹木形状のシミュレーション

これまでの樹木や草本の表現法は、手続き的形状定義法により3次元幾何モデルを生成するものと、実写画像や生成テクスチャによるマッピング手法によるものと大きく分けられる^{11), 12)}。後

図1 尾根線の生成

図2 図1の山岳地形によるCG画像

者は現時点では実用的な手法として多用されており、特に遠景のシミュレーションに成功している^{13)~16)}。しかしながら、3次元幾何モデルを持たないため原理的に近景のシミュレーションや揺らぎの表現には難点がある。そのため、前者の手法に関する研究も活発に行われてきている。筆者らの手法は、前者の手法に属するものである。さらに、特定の樹種の表現に重要となる分枝パターンに関するものではなく、さまざまな樹種に共通する“樹木らしさ”を感じさせる自然な樹形の表

(a) 向日性を考慮して得られる樹形

(b) 頂芽優性も考慮して得られる樹形

図3 樹木のシミュレーション

図4 樹皮のシミュレーション

現に関するものである。自然な印象をもつ“樹木らしさ”の表現、すなわち特にそれぞれの樹種に属する多用な樹形の表現や経年変化による樹齢に応じた樹形の表現には、紙面の都合上詳しく述べられないが“自然な枝振り”のシミュレーションが重要である。そのために、筆者らの生長モデルでは、樹木の性質である受光量不足による枝の枯死、生長枝の向日性、屈地性（負の重力屈性）、頂芽優性、休眠芽の休眠打破、および枝の幹化を考慮し、自然な枝振りを実現している。図3（口絵3, 4参照）に、この生長モデルにより生成された樹木を用いたCG画像例を示す。

今後の課題としては、樹皮形状の定義、葉の形状と分布の定義、および紅葉などの色彩変化のシミュレーション法の開発も興味深い。図4に、パネモデルにもとづいて樹皮のひび割れ形状の生成を試みた例を示す。また、色彩変化については次章を参照されたい。

4. 山岳・樹木の季節感のシミュレーション

特に、落葉広葉樹林に覆われた山岳は四季折々の様相を呈し、見る者に快い季節感を与えるものであり、このような山岳景観のシミュレーション手法の開発は興味深く重要である。筆者らは、特に架空の山岳への適用を目的として、樹林の新緑・紅葉・落葉や積雪・融雪による山岳の色彩変化をシミュレーションするための手法の開発を目指してきている¹⁷⁾。これまで、季節感の表現法に関する研究では、特に積雪のテクスチャに関する研究¹⁸⁾や、樹木の葉の紅葉に関する最近の研究¹⁹⁾以外見あたらない。

山岳景観の季節感のシミュレーションには、新緑・紅葉・落葉などの樹木の色彩変化のシミュレーションや、特に高山の積雪・融雪のシミュレー

シミュレーションが必要となる。いずれのシミュレーションにおいても、植生分布のシミュレーションが重要となる。日本の植生に大きな影響を与えていると思われる要因は、緯度・高度（温度、降水量）、地質・地形などである。したがって、シミュレーションしようとする山岳の緯度と高度が与えられれば、その地点で最も多く生育する群落が決定的である。ただし、樹木によっては、生えやすい土地（地質）が決まっているものもあり、尾根部や谷部では高度の高い地点と低い地点に対応した樹木も生育することや、特定の樹種の分布を定める群落特性を考慮して植生分布の生成を行う必要がある。さらに、それぞれの樹種に応じた色彩変化を与えるためには開葉から落葉までの葉の付き方の変化を与える開葉特性を考慮する必要がある。

図5（口絵5参照）に、植生の生成に基づいた山岳の色彩の季節変化のシミュレーション例を示す。

今後の課題としては、樹種と群度、樹種と開葉型・色彩変化についてさらに検討を深め、そのデータベース化と完全にアルゴリズム化することが残されている。

図5 季節感のシミュレーション
（上から、春、夏、秋、冬）

5. 粒子によるシミュレーション法

最近特に、粒子の運動による自然物・現象のシミュレーション法が活発に研究され、その有効性が示されてきている²⁰⁾。筆者らも、自然物・現象の多くが粒子によるシミュレーション法により表現可能であるという観点から、次章から示すように、炎・煙、ひび割れ、水流、および樹木・草本の揺らぎをシミュレーションするための場と粒子の行動モデルについて研究を進めてきている²¹⁾。前述した樹木の生長モデルも生長枝の先端を粒子とみなせば、粒子による運動シミュレーションともみれる。

一般に、粒子によるシミュレーション手法は、直感的なモデリングが可能である、モデルが理解し易い、インプリメントがし易いなどの特徴をもつ。粒子の運動やその軌跡でシミュレーションできるとされる自然物・現象は多い。これらを粒子によるシミュレーション法の適用性という観点から分けると、以下ようになる。最近(3)のように適用が自明ではないものへの応用も進んでいる。

(1) 明らかに粒子の運動や軌跡でシミュレーション可能であると推測させるもの：人間を含む動物の（群れの）行動、花火の“開花”や草木の葉や枝のしなやかな枝垂れ形状、木の葉・雨粒・雪などの落下運動、滝や砕け波をとまなう水流、煙のたなびき、積雪、……。

(2) 粒子のおかれる“場”の運動（特に気流の場）も重要となると推測させるもの：荒れ狂うように揺らぐ炎や煙、吹雪の雪舞や花・紙吹雪、木の葉の舞、強風による草・竹・木などのざわめき、布・髪・竹などの柔なん物体の運動、雲の形状、……。

(3) 適用性の推測が明らかではないもの：樹木の生長と形状、ひび割れ形状、侵食作用により形成された山岳形状、布・髪・竹などの柔なん物体の形状変化と運動、……。

6. 樹木の揺らぎのシミュレーション

筆者らは、前述したように、自然な樹形を生成する生長モデルの開発を試みてきているが、アニ

メーションへの応用には、静的な樹形のみならず、枝や葉の風による自然な揺らぎの表現が重要となる。これまで、頭髮や布の動きに関する研究の報告はいくつかあるが^{22)~25)}、樹木に関する報告は少ない^{11), 12)}。

風を必要とせず、樹木がシナリオに従って“自発的に揺らぐ”ような運動学に基づく表現法も考えられる。しかしながら、草原や森林を走り抜ける“風の走り”や、強風により樹木全体がかき乱され、関連しながらも枝が独立してざわめくような揺らぎを表現するためには、風の生成法と、風に対する樹木の揺らぎのシミュレーション法を用意しておく方がより自然で高い表現力が期待できる。特に、枯葉の舞や雪舞、炎や煙、旗などの柔なん物体、……などと共存する景観の表現に適する。

筆者らの手法²⁶⁾は、樹木を“緩やかに拘束しあう”隣接節点からなる木構造（これを節点モデルと呼ぶ）で近似し、その動きのシミュレーション

図6 樹木の揺らぎのシミュレーション

を行うというものである。節点モデルでは、樹木として与えられた形状を節点とそれらの緩やかな隣接関係で表す。それぞれの節点は質量を持った点で、力を受けるとその力に従って運動するが、隣接節点どうしは互いに近づきすぎたり離れすぎたりしないように位置関係を補正し合い、全体として樹木形状を崩さないように運動する。

なお、与えられた幾何モデルから節点モデルを自動的に生成するアルゴリズムも開発している。

図6に、柳のような物体に風をあてた様子を示す。左上から右下へと時間が経過している。

今後の課題としては、現在は無視している互いの枝の干渉テストの効率的な計算法の開発も重要である。

7. 炎・煙のシミュレーション

炎のCGシミュレーションとして、これまでparticle systemによる花火のような炎のシミュレーション²⁷⁾、2次元テクスチャと種々の加工操作を用いた焚火やろうそくのシミュレーション²⁸⁾、ボリュームレンダリングに基づいたろうそくの表現²⁹⁾、簡単な遷移規則をもつセル・オートマトンによるアルコールを燃やしたような炎のシミュレーション³⁰⁾などが行われている。煙のCGシミュレーションとしては、フーリエ級数で表された煙

図7 樹木の炎上

を表示する手法が提案されている³¹⁾。乱流のスペクトル合成に基づく煙・炎や雪の表現法も提案されている³²⁾。しかしながら、これらの手法は、障害物や他の燃焼物体などが配置されている場合のシミュレーションが難しい、形や動きの揺らぎの制御が容易ではないなどの点で不十分である。

筆者らの手法³³⁾では、煙や炎を基本的には“煙や炎の粒子による”気流の可視化像であると仮定し、まず時間的に変化する乱流の速度場（これを“渦場”と呼ぶことにする）を大小さまざまな渦の速度場の合成として発生させ、次にこの“渦場”に従い煙や炎の構成要素である粒子を移動させ、煙や炎の形や動きをシミュレーションしている。粒子は基本的には気流のトレーサであるが、いくつかの行動規則に従って運動する。さらに、渦もその発生、成長、衰退、移動などの行動規則に従って運動し、渦場を更新していく。また、簡単な熱伝導による延焼のモデルも実現している。

この粒子によるシミュレーション結果は粒子の移動軌跡として得られる。したがって、粒子の移動軌跡から煙や炎の画像を生成する手法も必要となる。本手法により、樹木の炎上のシミュレーションを行った例を図7（口絵6参照）に示す。

今後の課題として、3次元への拡張および本モデルでは実現できていない、爆発するような炎、SLの噴煙や火山の噴火に見られるようなもくもくした形の煙なども表現できるモデルへの拡張があげられる。

8. 水流のシミュレーション

山岳の溪流や岸壁に打ち寄せる砕け波などの複雑な水の形と動きのシミュレーションは、非常に興味深い。しかしながら、水の振る舞いをまじめに扱おうとすると、計算流体力学の高度な手法を駆使する専門的能力と莫大な計算コストが要求される。筆者らは、水を仮想的な粒子である“水粒

(a) 粒子による運動シミュレーション

(b) 水流表面の生成とCG画像

図8 水流のシミュレーション

子”の集まりであると考え（流体粒子と呼ぶと叱られるのでこう呼んでいる）、溪流などの複雑な水の振る舞いの表現のための、水粒子の行動モデルの開発を行っている。これまで、やはり粒子による手法で滝の流れのシミュレーションを行った例が文献とアニメーション作品で報告されている³⁴⁾。しかしながら、それぞれの粒子はなんら影響を及ぼし合うことのない独立したものであるため、水の自然な流れの印象は得られていない。

水流の表現のために重要と思われる水の振る舞いの視覚的特徴として、水の溜まり、障害物や壁面の回避となだらかな流れ、空隙へのなだれ込みと衝突・合流、水の砕けによる飛沫の発生、などがあげられる。筆者らは、このような水の振る舞いの視覚的特徴を表現するために、水粒子の性質に関するいくつかの仮定をおいた行動モデルを作成している。ただし、現在の仮定だけでは水の崩れる速度が遅いので、現在改良中である。

図8(a)に粒子によるシミュレーション例を示す。図8(b)（口絵7参照）にはこれらの粒子を電荷とみなしたときの等電位面を“水面”として生成したCG画像を示す。

9. 釉薬の貫入パターンのシミュレーション

ひび割れは、コンクリートの表面、大理石、露出した岩盤、陶磁器の表面、樹皮やメロンの皮などに見られる。ひび割れ形状は物体の材質感の視覚的印象にとって重要な要素であるため、そのシミュレーション法はCGでの材質感の表現に多く

の応用をもつ。これまで、平板状の泥のような物質が乾燥してできるひび割れ形状をシミュレーションするための、粘着性をパラメタとした成長モデルを開発している³⁵⁾。しかしながら、この成長モデルは平面上で動作するため、3次元物体の曲面上のひび割れの表現については、テクスチャマッピング手法によらざるを得ず、テクスチャの歪みは避けられない（図9(a)参照）。そのため、筆者らは陶磁器の釉薬にできる貫入（ひび割れ）パターンのCGシミュレーションに限定し、高さの場と呼ぶ平面正格子（2次元一価関数）で表された曲面上で動作する貫入の成長モデルを開発している。現在ほさらに、ボクセル空間と呼ぶ空間立方格子で表された立体表面上で動作するものへと拡張中である。

釉薬にみられる貫入の特徴は文献^{36), 37)}や筆者らの観察によると次のようにまとめることができる：(1)釉薬はその組成からガラスに似た素材であり、そこにできる貫入の成長速度は、材質が厚いほど速い。(2)貫入は他の貫入にほぼ垂直に交わる。(3)貫入の先端は生き残っていない。(4)貫入は滑らかな曲線を描く。(5)貫入は互いに反発しあって走る。(6)貫入は陶磁器の縁に垂直に入り、立ち消える。(7)釉薬の厚い部分での貫入はスケールが大きく、薄い部分での貫入のスケールは小さい。(8)早い時期にできた貫入は、比較的釉薬の薄い部分から発生している。(9)貫入は、釉薬が比較的薄い部分を走る。

図9(b)に、これらの仮定に基づいた成長モデル

(a) 平面版モデルによる貫入パターン

(b) 高さの場版モデルによる貫入パターン

図9 貫入のシミュレーション

によるシミュレーション例を示す。

10. おわりに

自然物・現象のCGによるシミュレーションに関する研究例として筆者らの研究を紹介させていただいた。少しでもこの分野の雰囲気が分かっていたいただければ幸いである。最後に、筆者らは扱っていないが、フラクタル手法や人物の表現に関する研究も大きな分野を形成していることをつけ加えておかねばならない^{1), 2), 38), 39)}。

この分野におけるCGは可視化技術であるとともにモデリング技術でもある。この辺にもこの分野の研究の魅力があるものと思われる。

参考文献

- 1) 情報処理学会「グラフィクスとCAD」研究会1989年度集中研究集会資料, 自然対象物のモデリングと表現技術, 89-CG-40, 1990.
- 2) 情報処理学会「グラフィクスとCAD」研究会1990年度集中研究集会資料, 人物のモデリングと表示技術, 90-CG-46, 1990.
- 3) 情報処理学会「グラフィクスとCAD」研究会1991年度集中研究集会資料, 動物・植物のCG表現とその応用, 1990.
- 4) A. Fournier, D. Fussell, L. Carpenter: Computer Rendering of Stochastic Models, Commun. ACM, **25**, 6, pp. 371-384, 1982.
- 5) 安居院, 宮田, 中嶋: 3次元山岳形状の等高線からの自動生成, 信学論, **J69-D(12)**, pp. 1905-1912, 1986.
- 6) K. Anjo: A Simple Spectral Approach to Stochastic Modeling for Natural Objects, Proc. EUROGRAPHICS' 88, pp. 285-296, 1988.
- 7) 三沢, 千葉, 斎藤: 自然の画像生成—山の手続的的形状定義法—, 情処学論, **28(1)**, pp. 35-45, 1987.
- 8) A. D. Kelley, M. C. Malin, G. M. Nielson: Terrain Simulation Using a Model of Stream Erosion, Computer Graphics **22**, 4, pp. 263-268, 1988.
- 9) F. K. Musgrave, C. E. Kolb, R. S. Mace: Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains, Computer Graphics **23**, 3, pp. 41-50, 1989.
- 10) 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 Vol. 45, No. 10, pp. 1240-1238, 1991.
- 11) 千葉: 樹木・草本の生成に関する研究動向, 情処研究報告「グラフィクスとCAD」, **40**, pp. 81-86, 1989.
- 12) 大野: 植物を対象とするCG技術の研究動向, 情処研究報告「グラフィクスとCAD」, **52**, pp. 13-18, 1991.
- 13) Gardner G. Y.: Simulation of Natural Science Using Textured Quadric Surfaces, Computer Graphics, **18**, 3, pp. 11-19, 1984-7.
- 14) 田北, 西田, 中前: リフレクションマッピングを考慮した3次元画像の合成法, 情処学会第35回全国大会, 1987, pp. 2013-2014.
- 15) 秋葉, 山本, 青木: 都市景観デザインへのテクスチャマッピング技法の応用, NICOGRAPH 論文コンテスト, 1987, pp. 245-252.
- 16) S. Takita, K. Kaneda, H. Iriyama, E. Nakamae, and T. Nishita: A Simple Method for Rendering Penumbrae Caused by Sunlight, Visual Computer, **7**, 5-6, pp. 259-268, 1991.
- 17) 高橋, 村岡, 千葉: 山岳景観の季節感のシミュレーション手法, 情処研究報告「グラフィクスとCAD」, **61**, pp. 25-32, 1993.
- 18) 大野: 山岳の表示 (その2), PIXEL No. 50, pp. 153-157, 1986. 7.
- 19) 早乙女, 藤代, 池邊: 生物学的モデルに基づく紅葉の可視化, 情報処理学会「CG シンポジウム '92」論文集, pp. 59-68, 1992.
- 20) Particle System Modeling, Animation, and Physically Based Techniques, SIGGRAPH '92 Course Notes 16, 1992.
- 21) 千葉: CGによる自然物・自然現象の表現(連載), PIXEL, No. 106-No. 114, (1991-1992).
- 22) 中嶋, 三輪, 安居院: 確率モデルによる頭髮の動きの表現, 電子情報通信学会・画像工学研究会, IE-89-60, pp. 23-28, 1989.
- 23) 原島, 小林, 森島: 糸状物体の質感および運動の表現, 第6回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp. 29-36, 1990.
- 24) 安生, 宇佐美, 栗原: 3次元コンピュータグラフィックスによる頭髮表現, 情処「グラフィクスとCAD」シンポジウム, pp. 127-134, 1991.
- 25) 大口, 奥澤, 上田: 力学計算による頭髮のアニメーション表現, 第8回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp. 93-103, 1992.
- 26) 河野, 佐藤, 千葉: 拘束節点による樹木の揺らぎのシミュレーション, 情処研究報告「グラフィクスとCAD」, **59**, pp. 9-16, 1992.
- 27) W. T. Reeves: Particle System—A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects, Computer Graphics **17**, 3, pp. 359-376, 1983.
- 28) 大島, 板橋: 2次元テクチャを用いた炎の動的表現, 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 4, pp. 435-447, 1991.
- 29) M. Inakage: A Simple Model of Flames, CGI '90, pp. 72-??, 1990.
- 30) 安居院, 河野, 中嶋: コンピュータグラフィックスにおける炎の2次元画像の生成, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J74-D-II, No. 2, pp. 184-189, 1991.
- 31) 西田, 中前: 大気中の不均一微粒子の表示法, 情報処理学会第35回論文集, pp. 2307-2308, 1987.
- 32) G. Sakas, et al.: A Functional Approach to the Visual Simulation of Gaseous Turbulence, Eurographics '92, pp. 107-117, 1992.
- 33) 守田, 村岡, 千葉: 渦場による炎や煙のCGシミュレーション, 第6回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp. 109-118, 1990.
- 34) K. Sims: Particle Animation and Rendering Using Data Parallel Computation, Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, pp. 405-413, 1990.
- 35) 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-D2, No. 10, pp. 1742-1750, 1990.
- 36) 素木: 陶芸・セラミック辞典, 技術堂出版, 1982.
- 37) 平田: キリンのまだら, 中央公論社, 1975.
- 38) 宮田: 講座・最先端コンピュータグラフィックス—3次元CGの手ほどき—フラクタル入門, テレビジョン学会誌, **46**, 6, pp. 733-740, 1992.
- 39) 末永他: 講座・最先端コンピュータグラフィックス—3次元CGの手ほどき—人間のCG表現と応用, テレビジョン学会誌, **46**, 8, pp. 1012-1020, 1992.

口絵3 向日性を考慮して得られる樹木のシミュレーション

口絵4 頂芽優勢も考慮して得られる樹木のシミュレーション

(岩手大学 千葉則茂) (本文107頁参照)

口絵5 季節感のシミュレーション(上から春,夏,秋,冬)

(岩手大学 千葉則茂) (本文107頁参照)

口絵6 樹木の炎上

口絵7 水流のシミュレーション(水流表面の生成とC.G画像)

(岩手大学 千葉則茂)(本文107頁参照)