

成長を考慮した樹皮のCGモデル

広田 光一, 加藤 弘和, 金子 豊久

豊橋技術科学大学 情報工学系

本研究では、樹皮の表面のひび割れパターンを、力学的モデルにより生成する手法を検討した。樹皮の近傍の領域を、樹木の表面の構造に関する植物学の知見に基づいて、層状のモデルとして表現した。このなかでは各層を、樹皮表面の微小領域をノードで、それらの間の結合をバネで表現するバネモデルで記述した。ひび割れパターンは、樹木の成長にともない表層に生じる力に基づいて微小領域間の結合が破断した結果として発生する。さらに、樹木の比較的長期の成長における樹皮の生成・ひび割れ・剥離・脱落の過程を考慮するために、モデルにおける表層を多層化し、また表層を生成するメカニズムを付加することを試みた。

このようなモデルに基づくシミュレーションにより、物理的特性を変化させることにより目的とした樹皮パターンが生成されることを示した。また、樹皮をひび割れ、剥離、および新層形成の繰り返しにより、その成長過程のCG表現が可能であることを示した。

A physically-based Simulation Model of Growing Tree Barks

Koichi HIROTA, Hirokazu KATO, Toyohisa KANEKO

Department of Information and Computer Sciences,
Toyohashi University of Technology

In this paper, we describe a physically based simulation model of tree barks. Based upon careful observation of tree and bark growth we devised a multiple layer model for describing the growth of barks. The most external layer is the observable bark and the most internal layer is that of representing the origin of the bark growth. Furthermore we used a spring-mass model for simulating the process of cracking barks. We carried out a computer simulation and the resulting patterns resemble the actually observed bark patterns reasonably well.

1 はじめに

近年、現実感の高いCG表現が様々な領域で利用されるようになってきている。このなかで樹木の表現は、風景のシミュレーションに不可欠であることから比較的多くの研究がなされてきた^{[1],[2],[3]}。また、木の成長過程を表現する試みもあるが、これらは主に木の形状やそれが環境から受ける影響に関するものであった^{[4],[5]}。本研究では、樹皮の表面に見られるひび割れパターンに着目し、これを生成する手法について検討する。樹皮の模様は、特に近景のCG表現において、現実感に寄与すると考えられる。

これまでに、樹皮パターンを表現する手法として、テクスチャを生成しこれを樹の形状の表面にマッピングする手法が提案されている。このようなテクスチャの生成には、写真などの実画像からデータを取得する方法^[6]の他に、フラクタルなどを用いて幾何学的に生成する方法^[7]も提案されている。しかしながら、これらの手法は一時期の樹皮のパターンを表現することは可能であるが、樹木の成長などを考慮したものではなかった。さらに、これらの手法においては、複雑な形状へのマッピング方法や樹皮表面の凹凸感の表現方法などが問題として挙げられる。

テクスチャを用いる手法の一つとして、村岡らによる「断片貼り付け法」がある^[8]。この手法は、樹木の表面に樹皮の断片形状を無数に貼り付ける手法であり、貼り付ける断片の形状、数量を変化させることにより複数の種類の樹皮と、樹皮表面の凹凸感を表現することが可能であることが示されている。しかしながら、経年変化の表現という観点からは、これ有効な手法であるとは考えられない。

また、樹皮のひび割れ現象を、対象物の内部の応力の変化により表面部で生じる破壊現象の一つであると仮定し、バネを用いて表現するモデルが千葉ら^[9]によって提案されている。これは、バネモデルによる破壊現象シミュレーションの手法を樹皮のモデリングに適用したものである^{[10],[11]}。

千葉らによるモデルは二次元状に張られたバネからなる層と形成層の二層からなり、形成層が生長していく過程でバネが切断され、ひび割れが発生していくモデルである。このモデルでは複数のひび割れのパターンを発生させるために、バネ定数を変化させることでそのパターンの変化を表現することができるが、その設定方法は論じられておらず、シミュ

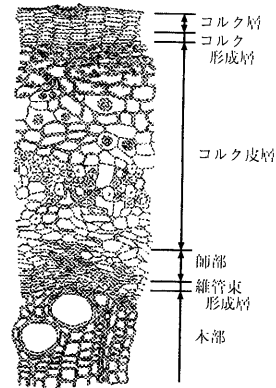


Fig.1: 幹の模式図

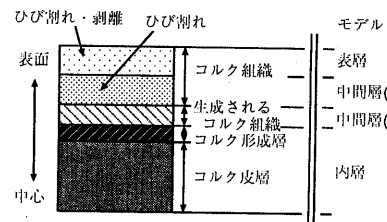


Fig.2: 樹皮表面部のモデル化

レーション結果についても、実用的には十分なものとはいえない難かった。

本研究では、樹皮の表面の成長の過程を考慮したひび割れパターンを、力学的モデルにより生成する手法を提案する。具体的には、樹皮の近傍の領域を、樹木の表面の構造に関する植物学の知見に基づいて、層状のモデルとして表現する。このなかでは各層を、樹皮表面の微小領域をノードで、それらの間の結合をバネで表現するバネモデルで記述するものとする。また、ひび割れパターンは、樹木の成長にともない表層に生じる力に基づいて微小領域間の結合が破断した結果として発生するものとする。さらに、樹木の比較的長期の成長における樹皮の生成・ひび割れ・剥離・脱落の過程を考慮するために、モデルにおける表層を多層化し、また表層を生成するメカニズムを付加することを試みる。以下では、その詳細および結果について論じる。

2 樹皮のモデル化

樹木のひび割れや剥離の現象は、樹木の成長により表面部の組織が変化することで生じる。樹木の

肥大成長は維管束形成層とコルク形成層の2箇所において行なわれている^[12](Fig.1)。維管束形成層の成長による変化は年輪の生成に影響することが知られているが、我々の注目している樹皮表面の組織の変化には影響しないと考える。すなわち、コルク皮層から内部の組織は肥大成長に伴い、単純に増大すると仮定する。樹皮表面部では、表面のコルク組織からひび割れてやがて剥離し、その内側のコルク組織ではひび割れが生じ、さらに内側では新たなコルク組織がコルク形成層から作られる。すなわち、成長のある一時点において、樹木の表面部は図2のような複数の層をもつモデルで構築できると考えられる^[13]。ここに、表層から中間層(2)までが樹皮のコルク組織に、内層がコルク形成層およびコルク皮層以下の組織に対応する。以下では、このようなモデルにより多様な樹皮パターンの生成と成長を考慮した変化のシミュレーションについて述べる。

3 2層モデルによる樹皮パターンの生成

3.1 モデルと視覚表現

樹皮パターンは、樹皮の表面がひび割れることで形成される。ここではまず、ひび割れの発生だけに着目し、これをひび割れの生じる表層とその内部を構成する内層の2層からなる円柱型モデルを考えた(Fig.3)。各層をそれぞれ微小な体積領域に分割し、これらをノードにより表現する。また、層内および層間の微小領域間の結合を、それぞれバネおよびせん断バネで表現した。シミュレーションでは、半径および高さ成長が内層の拡大として実現され、ひびの発生がこれにともなう表層の力学的移動とバネの破断により表現される。このモデルの挙動は、Table 1に示されるパラメータにより決定される。また、ひび割れはFig.4に示すような方法により視覚化される。

3.2 樹皮パターンの生成結果

樹木の種類として(1)クスノキ、(2)ナンキンハゼ、(3)松の3種類を選び、表2に示されるようにパラメータを設定し、シミュレーションを行なった。ヤング率とせん断弾性係数は材料力学などの分野において用いられている木材に対する値を用いた^[14]。なお、2層からなるモデルでは、これに発生するひび

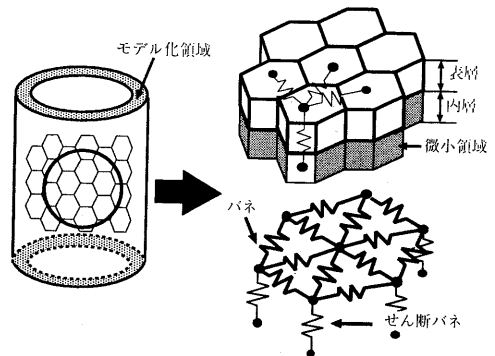


Fig.3: 2層型のモデル

Table 1: シミュレーションに用いられるパラメータ

樹皮の性質に関するパラメータ	
樹皮の密度	$\rho[\text{g}/\text{cm}^3]$
ヤング率	$E[\text{g}/\text{s}^2 \cdot \text{cm}]$
せん断弾性係数	$G[\text{g}/\text{s}^2 \cdot \text{cm}]$
材料のばらつき	$\sigma[-]$
バネの限界平均伸び率	$\bar{\kappa}[-]$
樹木の成長に関するパラメータ	
層の厚さ	$D[\text{cm}]$
初期ノード間隔	$L_o[\text{cm}]$
初期高さ	$H_o = L_o N_H$
初期半径	$R_o = \sqrt{3} L_o N_R / 4\pi$
最大成長期間	$T[\text{s}]$
半径成長	$\delta r[\text{cm}/\text{s}]$
高さ成長	$\delta h[\text{cm}/\text{s}]$

の間隔の推定が可能であり、ここでは、パラメータを推定に基づいて決定している^[14]。この結果として得られたパターンを実物の写真と比較したのがFig.5である。また、これらのパターンの縦横のひびの間隔を計測した結果をTable 3に示す。

Table 2: 特定の樹皮パターンに対するパラメータ

	(1) クスノキ	(2) ナンキンハゼ	(3) 松
$L_o[\text{cm}]$	0.33	0.33	0.33
$E_1[\text{g}/\text{s}^2/\text{cm}]$	107.1×10^7	117.3×10^7	117.3×10^7
$E_2[\text{g}/\text{s}^2/\text{cm}]$	117.3×10^7	117.3×10^7	117.3×10^7
$G[\text{g}/\text{s}^2/\text{cm}]$	47.7×10^7	53.3×10^7	53.3×10^7
$\bar{\kappa}_1[-]$	1.040	1.033	1.038
$\bar{\kappa}_2[-]$	1.015	1.015	1.023

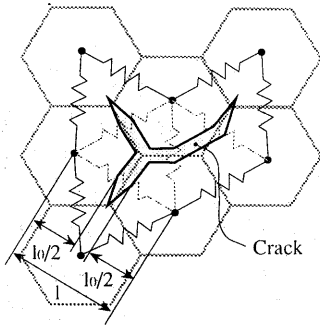
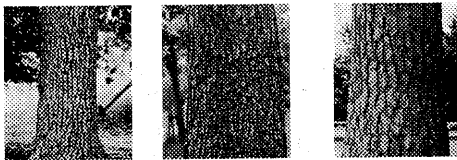
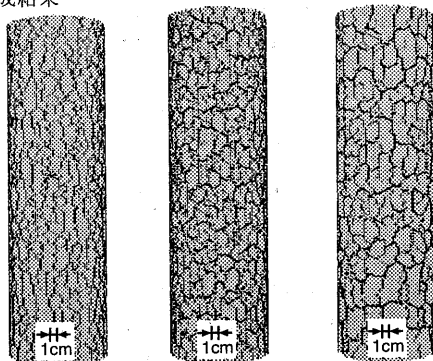


Fig. 4: ひび割れの視覚的表現

写真



生成結果



1. クスノキ 2. ナンキンハゼ 3. 松

Fig. 5: 樹皮パターンの生成結果

以上の結果から、生成された形状は実物の樹皮に近いものとなり、目的とする樹皮を生成することができたと考えている。なお、生成結果におけるひびの間隔が実測に比較して小さくなる傾向は、推定のアルゴリズムの適用の方法の問題によるものである。

Table 3: ひび割れ領域の形状

領域の大きさ		観察結果 [cm]	実験結果 [cm]
クスノキ	平均	$1.5 \times (> 20)^{*1}$	1.58×11.6
	最大		$2.06 \times (> 20)$
ナンキンハゼ	平均	$1.5 \times 3.0^{*2}$	1.70×3.02
	最大		2.08×3.96
松	平均	$3.0 \times 7.0^{*3}$	2.34×4.28
	最大		3.24×6.48

*1: 地面に垂直な方向 (縦方向) に多くひび割れが生じている。

*2: ひび割れに囲まれた領域 (閉領域) を構成する。

*3: 樹皮の一部が剥離している。大きな樹木ほど、大きな閉領域を構成するようになる。この値は半径が5~10[cm]ほどの樹木の場合。

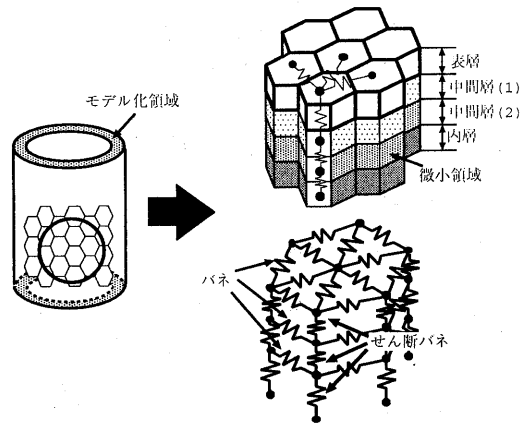


Fig. 6: 4層型のモデル

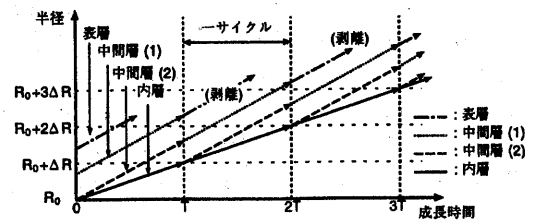


Fig. 7: 時間の経過に応じたノード位置の変化

4 樹皮の成長のシミュレーション

比較的長期間の樹皮の変化を考えると、樹皮の表層は剥離や脱落などにより徐々に失われ、一方で、

Table 4: 剥離の計算に用いられるパラメータ

限界平均せん断ひずみ	$\bar{\kappa}_R[-]$
乾燥範囲	$\eta[cm]$
乾燥係数	$\gamma[-]$
剥離領域割合	$A[-]$

コルク形成層においては、これを補うように新たなコルク質の組織が生成されて、これにより樹皮の新陳代謝が行われていると考えられる。また、この程度の期間に注目すると、木部の形成による幹の太さの変化が表面のひび割れパターンに無視できない影響を与えることが予想される。ここでは、樹皮表面のパターンの経年変化を表現するため、樹皮の剥離、新層の形成を考慮したモデルを構成し、シミュレーションを行う。

4.1 樹皮各層の成長

樹皮の剥離が生じる場合、表層が剥離した領域では、その下の層が露出することから、表面のコルク層をモデルでは複数の層で表現する必要がある。また、新しいコルク質の生成による成長を考慮するためには、コルク層の最下層の厚さが時間の経過とともに増加すると仮定するのが適当であると考えられる。これらの変化を考慮するとモデルの構成としては4層以上を持つことが望ましいと考えられる (Fig.6)。すなわち、ひび割れおよび剥離を生じる表層、剥離にともなう露出する中間層 (1)、成長にともなう厚さが増加する中間層 (2)、そして、コルク皮層に相当する内層である。

一方、大きな樹木の年輪を観察すると、一層あたりの年輪の幅はほぼ一定であることがわかる。すなわち、木自体の太さの変化をもたらし木部の成長は内層自体が半径方向に拡大することで表現できると考えられる。シミュレーションは、中間層 (2) が中間層 (1) と等しい厚さに成長する期間 (T) を1サイクルとして考えるものとした。このとき、各層の半径方向の位置は時間に関して Fig.7 のように変化することになる。ここに、 ΔR は期間 (T) における内層の半径の成長幅である。また、1サイクルごとに、中間層 (2) が中間層 (1) に、中間層 (1) が表層に役割を交代することで、各層は図中の矢印により示されているように、外側へと移動してゆく。

4.2 剥離のシミュレーション

剥離の現象は、幹の肥大により層間のせん断応力が高まり生じると考えられ、本モデルでは表層と中間層 (1) の間に限界せん断ひずみを設定し、モデルの成長によりせん断バネを切断することで剥離を表現する。さらに、樹皮は成長によるせん断応力の変化だけでなく、乾燥や外力により剥離の現象が生じると考えられるため、これらの現象も考慮した (Table 4)。

まず、乾燥による影響については、ひび割れと一部が剥離している近傍では、乾燥により剥離が促進されると考え、その領域内に存在する層間の結合は他の部位に比べ弱いと仮定した。具体的には、剥離が促進される領域は、ひび割れまたは剥離を生じている部分から $\eta[cm]$ 以内と仮定し、この範囲内に存在するノードの限界せん断ひずみが時間に関して指数的に減少するものとした。つぎに、外力による影響については、樹皮の微小な断片は内部と結合している場合においても、外力により結合が破断し、剥離すると考えられる。ここでは、この影響を表層のひび割れに囲まれた領域の面積と、中間層 (1) の結合領域の面積の比による剥離条件を設けることで表現した。すなわち、表層に生じたひび割れによって生成される閉領域と、中間層 (1) との結合領域の比が、設定する剥離領域割合 (A) を超えた時に、その領域に対し剥離するとみなした。なお、剥離が発生した領域では表層の領域を排除して、下の層が露出するものとして視覚表現が行われる。

4.3 樹皮の成長結果

図 8 に、本研究でシミュレーションにより生成した、樹皮の成長結果を示す。ひび割れの発生していない状態から、各ノードを高さ方向と半径方向に成長させていくと、時間経過に伴い、ひび割れが発生してくることが確認された。また、ひび割れの発生により、剥離が進行していく様子もうかがえる。さらに、数サイクルにわたる変化から、樹皮の成長にともなう層の生成から剥離・脱離の過程が繰り返されることを確認した。

5 まとめ

本研究では、物理的モデルによる成長を考慮した樹皮の CG シミュレーション手法を提案した。樹木

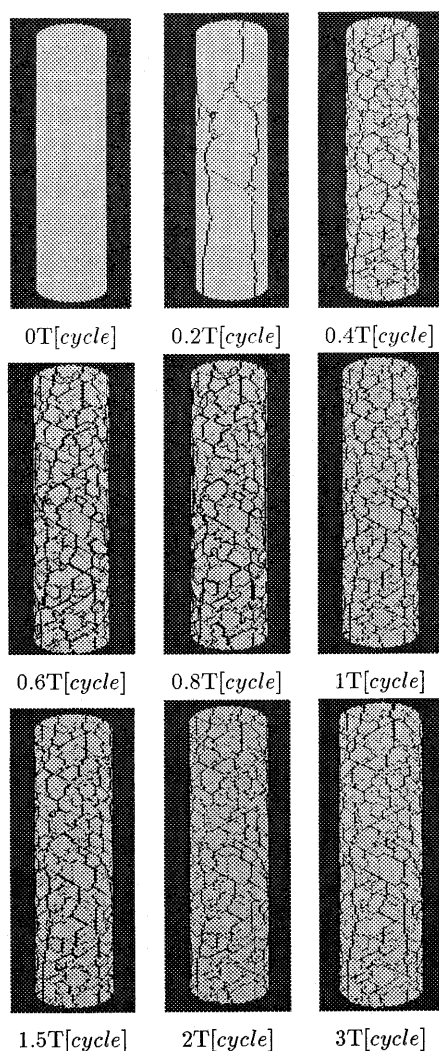


Fig.8: 樹皮の成長結果

の構造に関する知見をもとに樹皮をバネのメッシュによるモデルで表現し、これをもちいることで、様々な種類の木のひび割れパターンおよび成長にともなうパターンの変化を生成できることを示した。

ひび割れパターンの経年変化の過程の表現は、樹木の成長における樹皮の変化の過程のアニメーション表現を可能とするものであり、樹木全体の成長シミュレーションと組み合わせることで、樹木の各部のパターンの相違なども表現できる可能性がある。このための課題として、複雑な樹木形状をもつモデルを生成する手法の検討が必要である。また、モデ

ルを実際の樹木の挙動に近づけるために、樹液の影響や樹皮カールなどの表現方法なども検討していく予定である。

参考文献

- [1] 安居院, 福田, 中島: '景観表示のための樹木の生成手法,' 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.5, pp.618-625, May 1991.
- [2] J. Weber, J. Penn: 'Creation and Rendering of Realistic Trees,' *Proc. SIGGRAPH'95*, pp.119-128, 1995.
- [3] M. Aono, T.L. Kunii: 'Botanical Tree Image Generation,' *IEEE CG&A*, pp.10-34, May 1984.
- [4] 乃万: '植物の生長/非生長モデル-環境の影響の非生長的表現に向けて-, 'グラフィクスと CAD, Vol.52, No.6, pp.35-42, 1991.
- [5] P. Prusinkiewicz, M.S. Hammel, E. Mjolsness: 'Animation of Plant Development,' *Proc. SIGGRAPH'93*, pp.351-360, 1993.
- [6] J. Bloomenthal: 'Modeling the Mighty Maple,' *Proc. SIGGRAPH '85*, 1985.
- [7] P.E.Oppenheimer: 'Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees,' *Computer Graphics*, Vol.20, No.4, pp.55-64, 1986.
- [8] 村岡, 千葉: '樹木のビジュアルシミュレーションのための一樹皮生成法,' 平成七年度電気関係学会東北支部連合大会予稿集, p.359, 1995.
- [9] 佐藤, 金丸, 千葉, 西関: '樹木の CG シミュレーションのための樹皮のひび割れの成長モデル,' 平成 2 年度電気関係学会東北支部連合大会予稿集, p.291, 1990.
- [10] A.T.Skjeltorp, P. Meakin: 'Fracture in Microsphere Monolayers Studied by Experiment and Computer Simulation', *Nature*, Vol.335, pp.424-426, 1988.
- [11] A. Norton, G. Turk, B. Bacon, J. Gerth, P. Sweeney: 'Animation of Fracture by Physical Modeling,' *Visual Computer*, Vol.7, pp.210-219, 1991.
- [12] 植田編: 植物構造図説, 森北出版
- [13] 名取, 広田, 金子: 'バネ-マスモデルを用いたひび割れの生成シミュレーション,' 平成 8 年度 電気関係学会東海支部連合大会 講演論文集, p.397, 1996
- [14] 堂山, 山本編: 材料テクノロジー 12 構造材料 [II] 非金属系, 東京大学出版会
- [15] 広田, 星野, 金子: '物理的モデルに基づくひび割れパターンの発生,' 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.12, 1996