

## Biologically-Based Modeling に基づく紅葉の再現 - 樹木個体のレベルにおける色変化 -

早乙女 良江<sup>†</sup>      藤代 一成<sup>‡</sup>      池辺 八洲彦<sup>†</sup>  
筑波大学<sup>†</sup>      お茶の水女子大学<sup>‡</sup>

平成5年10月22日

紅葉は、3つの植物色素(クロロフィル・カロチノイド・アントシアン)の配合変化によってもたらされることが知られている。紅葉は7段階に離散化される[7]。我々は、この生物学的事実のマッピングとして、紅葉発現プロセスを2D-葉個体レベルにおいて忠実にトレースできる画像生成モデルを提案した[4]。この論文では、このモデルを3D-樹木個体レベル(葉の幾何構造を持つ集合体)に拡張する。この場合、各葉の紅葉ステージは、その葉への累積日射量から一意に決定されると仮定される。各葉への累積日射量は、その葉への1日の日射量を指定日まで積分して得られる。各葉への1日の日射量は、“開葉時期”、“太陽の運行”、“樹冠内の葉の相対的位置”の関数として決定される。樹冠内の葉の相対的位置の決定に、分枝行列則と3次元幾何樹木システム A-systemGMT1(3)を用いた。以上のモデルを実際の画像合成実験により検証してみたところ、一斉/順次開葉タイプの紅葉発現プロセスを再現することが示された。

## A Biologically-Based Approach to Autumn Coloration Modeling - a case of single tree -

Yoshie Soutome<sup>†</sup>      Issei Fujishiro<sup>‡</sup>      Yasuhiko Ikebe<sup>†</sup>  
University of Tsukuba<sup>†</sup>      Ochanomizu University<sup>‡</sup>

October, 22th, 1993

The autumn coloration of leaves results from concentration changes of three plant pigments (chlorophyll, carotenoid, anthocyan). The total coloration process is discretized into seven stages [7]. As a mapping of this biological fact, we proposed earlier [4] a CG model would create photorealistic images to trace the autumn coloration process of a *single 2D-leaf*. In this paper we extend our model to a *single 3D-tree* as a geometrically structured set of leaves. Computer experiments show that our model well reproduce the autumn coloration process of leaves both for the fixed growth and free growth type leaves.

# 1 研究の背景と目的

近年のコンピュータグラフィックスでは自然物象のモデリング/レンダリングが盛んに行われている [1] [2] [3]. 本研究に関連の深い樹木についても 60 年代後半から盛んに研究されているが [3], そのどれもが形状の発生に力点をおいており, 色変化を主たるテーマとするものは調べた範囲ではほとんどなかった.

日本のように四季がある地域において, 公園設計・森林経営などを行う場合, “季節感” を付加した景観シミュレーションができれば, 1 年を通じた環境の変化を知る上での有効な手段として役立つことが期待される. とくに我々は, 晩秋から初冬にかけて日本全国でみられ, 葉個体の色変化によって起こる“紅葉”による樹木の色変化に注目してきた.

これまでの研究では, 紅葉のメカニズムを主として支配する“エイジング”と“植物色素(クロロフィル・カロチノイド・アントシアン)の配合変化”の 2 つの生物学的要素を採り入れて, 葉個体レベルでの色変化を実現した [4][5]. 本研究では, そのモデルを拡張し, 樹木個体レベルで紅葉をモデル化する. そのための基本的考案は既に文献 [6] に報告した.

樹木個体レベルにモデルを拡張するにあたって, 各葉の紅葉の進行度合いを決定する主たる要因として, その葉への累積日射量を導入した. 各葉への累積日射量は, その葉への 1 日の日射量を指定日まで積分して得られる. 各葉への 1 日の日射量は, “開葉時期”, “太陽の運行”, “樹冠内の葉の相対的位置”の関数として決定される. 樹冠内の葉の相対的位置の決定には, 分枝行列則と A-systemGMT1(3) を用いた. 以上により, 一斉/順次開葉タイプの紅葉発現プロセスが再現できることを実例を用いて示す.

本論文は次節以降のように構成されている. まず, 次節で落葉広葉樹における紅葉の発現プロセスおよび紅葉モデルの全体像について説明する. 3 節で, 形状生成・紅葉時間・紅葉カラーの 3 つのサブモデルについて詳細に説明する. 4 節に紅葉モデルを基に作成した画像を示し, 本モデルの妥当性を考察する. 最後に本論文のまとめを行い, 今後の展望を述べる.

## 2 紅葉のメカニズムとモデリング

葉のレベルでの紅葉のメカニズムの詳細は, 文献 [4] に任せ, ここでは樹木個体レベルでの紅葉のメカニズムを説明する. また, 付録に本論文で使用している紅葉の用

語をまとめてあるので参照されたい.

### 2.1 落葉広葉樹の紅葉の発現プロセス

小池は, 落葉広葉樹の開葉と樹冠の紅葉の順序に一定の関係があることを示した [8].

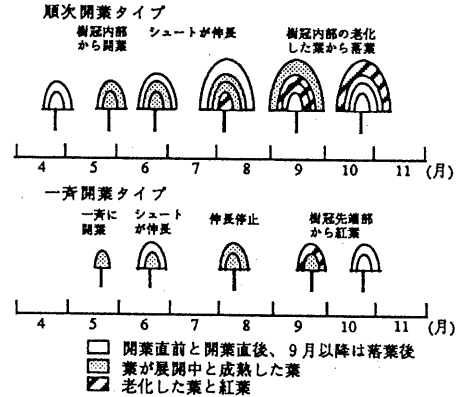


図 1: 落葉広葉樹と紅葉の関係  
(文献 [8] より引用, 加筆)

落葉広葉樹には, 葉が長期間に渡って内部から先端部に向かって順次開く“順次開葉タイプ”と, 春一斉に開葉するような“一斉開葉タイプ”が存在し, 前者が内部から紅葉し, 後者は, 樹冠先端部から紅葉が起こることが知られている. このように紅葉の発現プロセスに差が出るのは, 開葉期間の差が葉個体の年齢差の有無を生み出しているからである. 加えて, 太陽の日射も紅葉に影響を与える. クロロフィル・カロチノイドの分解やアントシアンの生成は日射量を多く受ければ受けるほど進むことが知られている. 従って太陽光の当たりやすい部分の方が影響を受けやすい.

### 2.2 Biologically-Based Modeling

前項から, 各葉が受ける累積日射量が紅葉プロセスに大きく影響を与えるものと推測される.

この日射量算出には主として, 樹木による開葉時期の差, 太陽の運行経路, および葉の位置を要素としてモデルに採り入れる必要がある. 開葉時期は, 生成する樹木によって変更が可能であるようなパラメータとして設定する. 太陽の運行経路は, 通年変化の再現に対応するように概算する. そして, 葉の位置は, 太陽との相対的位置関係を示す葉の向き, 葉の存在レイアの樹冠内変化の 2 つの観点から求める.

以上のことをふまえて構成した紅葉モデルの概要を 図 2 に示す。

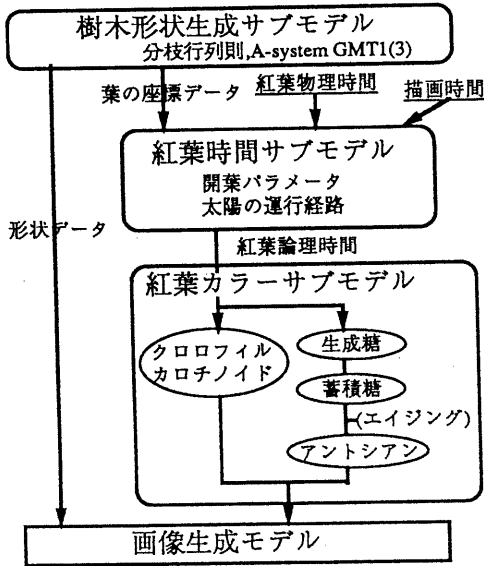


図 2: 紅葉モデルの概要

本モデルは、樹木形状生成・紅葉時間・紅葉カラーの 3 つのサブモデルおよび画像生成モデルによって構成されている。まず、樹木形状生成サブモデルが枝や葉に関する座標データを生成する。次に、紅葉時間サブモデルにおいて、紅葉物理時間の開始時から終了時までの各葉が受ける累積日射量を計算する。さらに、紅葉カラーサブモデルは、累積日射量から推定される紅葉論理時間をもとに葉上のカラー値を算出する。そして、最後の画像生成モデルで、上述した 3 つのサブモデルで作成された形状およびカラーデータを使用して画像を生成する。

次節でこの 3 つのサブモデルの各々について詳しく説明する。

### 3 モデルの詳細

#### 3.1 樹木形状生成サブモデル

このサブモデルは、樹木の形状、枝や幹などに関するデータを作成する。

Viennot らは、分枝行列を用いて樹木の分枝パターンを求めている [9]。分枝行列  $A$  は、図 3 にあるように各要素  $p_{i,j}$  が、あるラベルの親枝からラベル  $i$  とラベル  $j$  の子

枝に分枝する確率を表しているような  $n-1 \times n$  の確率行列である。分枝の方法は図 4 に示した。ここで、ラベル  $k$  の親枝が  $\text{bior}der(i,j)$  に分枝する場合、対応する子枝は  $i,j$  のラベルを持つ枝に分枝することを意味する。分枝行列の要素変更によって、さまざまな形状の樹木の生成が可能である。

$$A = \begin{pmatrix} p_{2,1} & p_{2,2} & 0 & \cdots & 0 \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \cdots & \cdots & p_{n,n} \end{pmatrix}$$

$$p_{k,j} (1 \leq j \leq k) = b_{k,j} / a_k$$

$a_k (k \geq 2)$  : order( $k$ ) の branching node 数

$b_{k,i} (1 \leq i \leq k)$  :  $\text{bior}der(k,i)$  の node 数

$b_{k,k} (k \geq 2)$  :  $\text{bior}der(k-1,k-1)$  の node 数

図 3: 分枝行列

(文献 [9] より抜粋)

・ order, bior に関する説明は図 4 参照

2 次元で構成されている Viennot らのモデルを、我々の紅葉モデルに適応させるために、3 次元に拡張する必要がある。拡張に際し、3 次元樹木生成幾何モデル A-system を参考にした [10, GMT1(3)]。

形状作成方法の手順

- (1) 1 つの親枝から必ず 2 つの小枝に分枝すると仮定する。分枝は、分枝角の等しい“二又分枝”と分枝角の異なる“単軸分枝”の 2 通りとする。

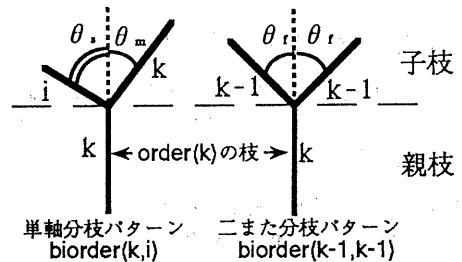


図 4: 分枝方法

- (2) 分枝行列を用いて全ての枝にラベルを設定する。
- (3) 枝につけられたラベルに従い、各枝の長さ・太さ・分枝角などを設定する。分枝角の左右設定には乱数を用いる。

- (4) 親枝から子枝の座標を求める。得られた枝の基部と先端部の座標は全てデータとして格納される。
- (5) 葉は、文献 [4] で採用したものを使用し、ラベル 1 の先端部を含む平面上に存在するものと仮定する。この葉の先端部の座標値は、紅葉論理時間算出に不可欠である。

### 3.2 紅葉時間サブモデル

図 5 に紅葉時間サブモデルの内部構造を示す。紅葉時間サブモデルは、紅葉物理時間から樹木個体内の各葉の紅葉論理時間の算出を目的とする。得られた紅葉論理時間から葉上のカラー値の計算を紅葉カラーサブモデルが行う。

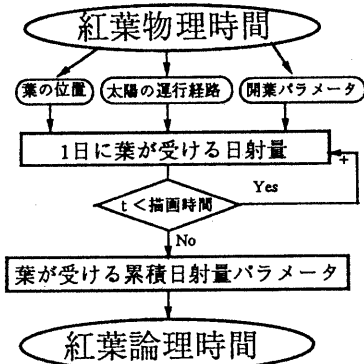


図 5: 紅葉時間サブモデル

#### 紅葉の論理時間算出手順

- (1) 太陽の運行経路の計算をする。
- (2) 形状生成サブモデルで得られた葉の基部の座標をもとに、一日に各葉が受ける太陽の総日射量を計算する
- (3) 紅葉物理時間の開始から終了まで (2) を繰り返し、各日までの蓄積の日射量に対応する日のパラメータとして格納する。

1枚の葉のレベルでは、葉に受ける日射量を一定と仮定して、色素と生成糖の量の時間的変化を決定していた。しかし、木のレベルに拡張するためには、葉の存在位置による葉の年齢の個体差と日射量の違いを考慮に入れなければならない。今回はモデルの複雑さを避ける意味で温

度・湿度などは理想的条件にあると仮定したため、入力としては図 5 のように、葉が受ける日射量パラメータの設定だけでよい。このパラメータは、樹木形状生成サブモデルで計算された葉の基部の位置と太陽の概算運行経路から推測される 1 日の日射量の強さから計算される。図 6 に葉と接平面の位置および葉と太陽との位置関係を示す。

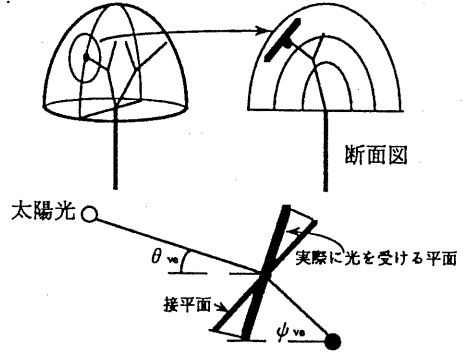


図 6: 日射量の強さによるパラメータ設定

#### 葉が受ける 1 日の日射量の計算方法

- (1) 葉の基部 (葉が枝につく部分) を含み、葉がついている枝との接平面を求める。
- (2) 葉の基部が属する木のレイアを求める。
- (3) 計算された値を次式に代入して得られる  $solar(t)$  が、1 日の日射量パラメータである。式中に  $\theta_{ho}$ ,  $\theta_{ve}$  が含まれているのは、太陽の運行経路の年較差を考慮に入れたためである。太陽の運行経路の概算には文献 [11] を参考にした。

#### 日射量パラメータの算出式

$$solar(t) = \alpha^{i(x,y,z,t)} S \int_{\theta_{da}(t)}^{\theta_{de}(t)} \cos(\theta_{ho} - \varphi_{ho}(x,y,z)) \times \cos(\theta_{ve} - \varphi_{ve}(x,y,z)) d\theta \quad (1)$$

$t$ : 日射量を計算する日 (紅葉物理時間)

冬至の日を 0 とし、次の年の冬至を 366 とする

$(x, y, z)$ : 葉の基部の座標値

$\alpha$ : 1 枚のレイアによってもたらされる光の透過率

$(0 \leq \alpha \leq 1)$

$i(x, y, z, t)$ : 葉の基部が存在するレイアの位置

$$i(x, y, z, t) = (1.0 - \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{\sqrt{x_{max}^2 + y_{max}^2 + z_{max}^2}}) layer \quad (2)$$

$x_{max}, y_{max}, z_{max}$  :各軸に対する葉の基部の最大座標値  
 $S$  :葉の基部を含む接平面の単位面積  
 $\theta_{ho}, \theta_{ve}$  :太陽の水平/垂直方向の向き  
 $\varphi_{ho}(x, y, z)$  :葉の基部を含む接平面の水平方向の向き  
 $\varphi_{ve}(x, y, z)$  :葉の基部を含む接平面の垂直方向の向き  
 $\theta_{ds}(t), \theta_{de}(t)$  :太陽の日の出/日の入りの方向  
 $layer$  :レイアの総数

この日射量パラメータ  $solar(t)$  を開始日時  $t_1$  から描画する日時  $t_2$  まで計算することで、実際に紅葉カラーサブモデルの入力として用いられる紅葉論理時間(紅葉の実質的な進行度合い)が求められる。

$$solar = \sum_{t=t_1(x,y,z)}^{t_2} (solar(t)) \quad (3)$$

$t_1$  の設定方法は以下の通りである。一斉開葉タイプでは、葉の年齢の個体差はほとんどないため、日射量が主として紅葉の時の色変化に影響を与える因子として考えれば良い。したがって、どの葉にも紅葉の開始時は一致するという仮定が成り立つ。そこで、式(3)の  $t_1(x, y, z)$  は全て同じ値とする。

しかし、順次開葉タイプでは、葉の年齢の個体差が生じるため、日射量だけでなく葉の年齢差も因子に加えるして考える必要がある。樹冠内部から開葉が起こるため、葉の年齢は内部にいくほど高くなる。紅葉の開始時を各葉に対応させなければならない。式(3)中の  $t_1(x, y, z)$  は、葉が全体に出そう日からさかのぼって計算を行い設定する。

$$t_1(x, y, z) = leaftime - (leaftime - t_1) \frac{layernum}{layer}$$

$leaftime$  :葉が樹冠全体に成長する日時

$layernum$  :葉の基部が存在するレイア 式(2) 参照

また、葉が全体に広がるまでは式(1)の  $i(x, y, z, t)$  も  $t$  に対応したものに更新する。

$$i(x, y, z, t) = \frac{leaftime - t}{leaftime - t_1(x, y, z)} layer$$

このようにすることにより、葉がまだ内部にしか存在しないときの層の設定を変更できるようになった。

これで、紅葉物理時間の開始時から終了時まで一斉開葉タイプ、順次開葉タイプのどちらにも対応した各葉の累積日射量のパラメータを計算および格納することができる。

### 3.3 紅葉カラーサブモデル

このサブモデルでは、図2で太い黒線で示されるように、紅葉論理時間を入力することにより、葉上全体のカラーが算出可能である。この部分は、我々が発表した論文[4]および[5]中の紅葉モデルに相当する部分であり、詳細な説明はそれに任せる。

既述した紅葉時間サブモデルで求められた樹木個体レベルでの樹冠内各葉の紅葉の進行度合いを示す紅葉論理時間を用いて、このサブモデルで各葉個体レベルでの色変化を計算し、この一連の動作を樹冠全葉に繰り返し行う。つまり、紅葉時間/紅葉カラーの2つのサブモデルは樹木個体から葉個体レベルへのトップダウン方式の階層構造をなしていることが分かる。

このサブモデルを本モデルへ移行する際の改良点を示す。文献[4]では入力として離散的な値である石倉の分類を用いたために、紅葉の連続的な変化を表現することができないことが欠点として残っていた。本モデルで、連続的な値が入力になるように改良し、葉上のカラー値を、連続的に計算することが可能になった。

## 4 結果と考察

本研究では、国立環境研究所社会環境システム部情報解析室の安岡善文室長と須賀伸介主任研究員の協力を得て当研究室に設置されている Iris Graphics Workstation Indigo を使用して画像を作成した。

分枝行列と乱数設定は等しいものとしているため、樹木形状は全ての画像において同じである。累積日射量のパラメータ算出に当たっては

$\alpha = 0.8, layer = 12, t_1$  の初期設定 = 150

順次開葉タイプの葉の成長日時  $leaftime = 250$  と設定した。

図7に順次、図8に一斉開葉タイプを想定した画像をそれぞれ時間が早い順(上から)(a): $t=200$ , (b):250, (c):300 [単位は day] に並べて表示している。

順次開葉タイプでは、 $leaftime=250$  であるため、 $t=200$  ではまだ葉が生えていない様子が表現されている。時間が経つにつれて紅葉が樹冠内部から先端部の方に向かっていくことがうかがえる。一方、一斉開葉タイプの方は、葉が最初から樹冠全体に成長しており、時間経過によって、外側の方から内部へ紅葉が進む様子が分かる。

日射量計算部分を変えずに、葉の開葉時期のパラメータだけを切り換えることによって2つのタイプに

適合する画像が作成できる。

また、画像は約 10 分/枚程度で作成でき、本モデルは描画時間的にも妥当な CG モデルであると考えられる。

## 5 まとめと今後の展望

文献およびフィールド調査から得られた落葉広葉樹の紅葉には葉の開葉期間、太陽の運行経路と葉による光の到達度が影響を与えると推測し、紅葉のモデル化を行った。この 3 要素を考慮にいれて、各葉が受ける累積日射量から紅葉論理時間を求め、従来の葉のモデルを用いて各葉上のカラー値を算出した。これにより、落葉広葉樹の一斉/順次開葉タイプに適合するような画像を再現することができた。

本モデルのキーポイントは、次のようにまとめられる。

- (1) A-systemGMT1-(3) 条件を付加して 3 次元に拡張した分枝行列則を用いた任意の樹木形状の作成が可能。
- (2) 開葉時期、太陽の運行経路および葉の位置 (レイア・向き) から紅葉論理時間を求めることにより、樹冠内部での葉の存在位置の違いによる紅葉の起こり方の差の表現が可能。
- (3) 従来の葉個体のモデルを用いて葉上での色変化が再現可能。

なお、以下の 3 点が今後の研究課題として残されている。

- (1) 林/森林レベルにモデルを拡張する。
- (2) 任意に生成される樹木形状に対して、CG で紅葉を再現する検証システムとして用いる。
- (3) 画像を実際に撮影した写真と合成して、景観シミュレーションを作成し、このモデルの実用性を確認する。

## 謝辞

落葉広葉樹の紅葉に関する文献調査の過程で貴重な御意見をいただいた森林総合研究所北海道支所の小池孝良氏に、深く感謝の意を表します。

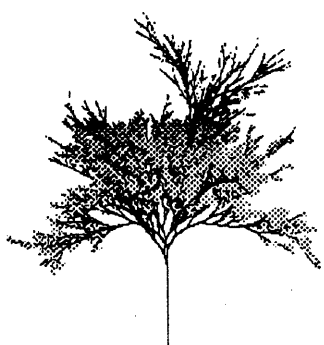
Iris Graphics Workstation の使用に関してご協力いただいた国立環境研究所社会環境システム部情報解析室の

安岡善文室長、須賀伸介主任研究員に使用することができ、心より感謝いたします。

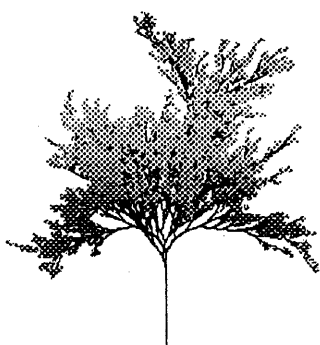
最後に、フィールド調査、文献調査等に協力していただいた全ての方々にお礼申し上げます。

## 参考文献

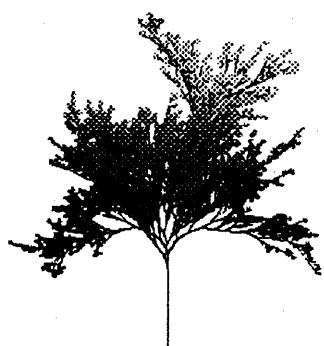
- [1] 中嶋正之: “CG による自然物体の生成に関する研究動向 (第 2 報)”, 情報処理学会研究報告 91-CG-52, pp.1-6, 1991
- [2] 千葉則茂: “樹木・草本の生成に関する研究動向”, 情報処理学会研究報告 89-CG-40, pp.81-86, 1989
- [3] 大野義夫: “植物を対象とする CG 技術の研究動向”, 情報処理学会研究報告 91-CG-52, pp.13-18, 1991
- [4] 早乙女良江, 藤代一成, 池辺八洲彦: “生物学的モデルに基づく紅葉の可視化—葉のレベルにおける色変化—”, 情報処理学会グラフィックスと CAD シンポジウム論文集' 9 2, pp.59-68, 1992
- [5] 早乙女良江, 藤代一成, 池辺八洲彦: “Biologically-based modeling による紅葉の再現—散りゆく葉が物語るもの—”, Pixel2 月号, No.125, pp.48-51, 1993
- [6] 早乙女良江, 藤代一成, 池辺八洲彦: “生物学的モデルに基づく紅葉の可視化—樹木の個体レベルにおける色変化—”, 第 46 回情報処理全国大会, Vol.46, No.2, pp.357-358, 1993
- [7] 石倉成行: “紅葉の生理科学”, 植物と自然, Vol.13, No.11, pp.32-35, 1979
- [8] 小池孝良: “落葉広葉樹の開葉と紅葉の仕方”, 北方林業, Vol.39, No.12, pp.12-15, 1987
- [9] Xavier Gerard Viennot, et al.: “Combinatorial Analysis of Ramified Patterns and Computer Imagery of Trees,” *Computer Graphics*, Vol.23, No.3, pp.31-40, 1989.
- [10] Masaki Aono and Toshiyasu L.Kunii: “Botanical Tree Image Generation,” *IEEE CG & A*, Vol.4, No.5, pp.10-34, 1984.
- [11] 国立天文台編: 理科年表平成 4 年版, 丸善株式会社, 1992



(a)  $t=200$

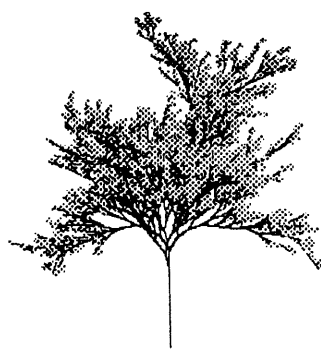


(b)  $t=250$

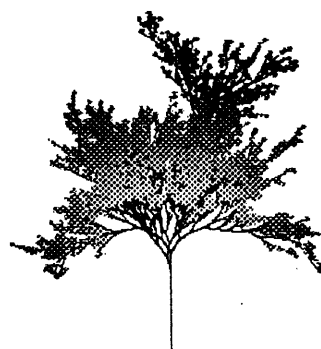


(c)  $t=300$

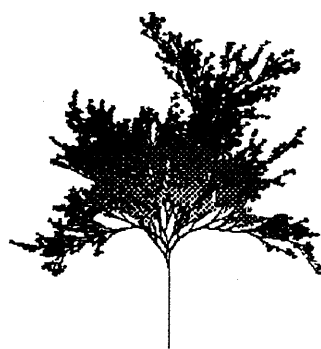
図 7: 順次開葉タイプ



(a)  $t=200$



(b)  $t=250$



(c)  $t=300$

図 8: 一斉開葉タイプ

# 紅葉モデル用語集

## ◇ 紅葉(黄葉)の種類

自然現象でいう樹木の秋の色変化には、“紅葉”、“黄葉”、“褐葉”の3つが存在する。

- (1) 紅葉:赤色色素によって葉が赤色に変わる現象
- (2) 黄葉:葉中に残された黄色色素によって葉が黄色に見える現象
- (3) 褐葉:タンニン系の物質生成により葉が褐色になる現象

## ◇ 紅葉の原理

秋になるとカエデ属など葉が赤変する植物の付け根に、離層というコルク質の組織が発達してきて、光合成によってつくられた糖などの養分が葉から茎へ移動するのを妨げるために、葉の細胞に余分にたまった糖分が赤色色素に作り替えられるからである。

## ◇ 離層

葉・果実・花が茎から脱離する場合、それらの器官の基部に形成される特殊な細胞層

## ◇ クロロフィル

光合成生物の葉緑体のチラコイド中に存在する同化色素の一種。葉緑素ともいう。

## ◇ カロチノイド

不飽和脂質の1つとして動植物に広く分布している黄・橙・赤ないし紫色の一群の色素

## ◇ アントシアニン

紅葉時に生成される赤色色素。例えば、ヤマモミジなどから単離される純粋な赤色色素は、アントシアンの一種であるクリサンテミンである。このクリサンテミンとは、紅葉時の種々の葉などに含まれる最も分布の広いアントシアンの一種である。

## ◇ 植物色素の配合変化

紅葉時になると、クロロフィル・カロチノイド量の減衰が始まり、最終的には分解される。アントシアンは葉に蓄積された糖を使用して生成され、葉全体に満たされる。この3つの植物色素の配合変化によって葉上の色変化がもたらされる。

## ◇ エイジング

生物学においては加齢と訳され、葉などの成長度合

いを示す指標。葉の老化は葉の先端ほど進み、枝梢ほど遅くなるため、エイジングもこれに対応して与えられる。紅葉時における色変化はこのエイジングにそうものである。

## ◇ 石倉の分類

葉上での紅葉の進み方を7段階に分類している。

	その段階の葉上の様子
1	緑色
2	葉脈の所々が暗緑赤色
3	葉脈縁を除く葉のおおよそ半分が暗緑赤色
4	葉脈縁を除く葉のほとんどが暗緑赤色
5	葉全体が暗緑赤色
6	赤色しかし葉のおおよそ半分が暗緑赤色
7	全体が赤色

## ◇ 紅葉の物理時間

紅葉が発現する実際の時間。時間は、冬至の日を0(日)、翌年の冬至の日を366(日)として設定する。

## ◇ 紅葉の論理時間

樹冠内各葉の紅葉の進行度合いを示す指標。石倉の分類を念頭に作成されている。この時間によって、エイジング・植物色素の配合変化を考慮した葉上の色変化が実現できる。

## ◇ 分枝パターン

枝が分岐することを生物学では分枝と呼ぶ。分枝には、分枝角が等しい単軸分枝と分枝角が異なる二又分枝がある

## ◇ 分枝行列

Viennot らが提唱した分枝方法を決定する行列。行列の添字が樹木の分枝パターンを表し、添字に対応する要素が分枝に関する確率を表す確率分布行列として定義されている。

## ◇ 一斉開葉タイプの紅葉の発現プロセス

春一斉に展葉するタイプ。太陽の当たりやすい樹冠先端部の方から紅葉する。カエデ、シナノキ、サワシバ、ブナなどの薄暗い森に成長する木が含まれる。

## ◇ 順次開葉タイプの紅葉の発現プロセス

長期間に渡って展葉するタイプ。葉個体のエイジングが高い樹冠内部から紅葉する。ヤナギ、シラカバなど明るい場所に育つ木が含まれる。