

生物学的モデルおよびフラクタルモデルに 基づいた人工紅葉システム

望月茂徳† 蔡東生‡

本研究では季節感を感じさせるような経時変化を持たせるため、生物学的モデルおよびフラクタルモデルに基づいた紅葉モデルを提案する。紅葉の重要な環境因子として日射量を取り上げ、紅葉進度の指標となる紅葉論理時間を設け、それに基づいて生物学者による実験データを利用する。また、葉の形やエイジングなどのフラクタル性を表現するためにカオスゲームアルゴリズムを用いて紅葉を描画する。

Virtual Autumn Coloring System Based on Biological and Fractal Model

Shigenori Mochizuki† Dongsheng Cai‡

In the present paper, we simulate the time evolution of autumn coloring of both maple leaves and entire trees, and propose both biological and fractal models of this process. We calculate the amount of sunlight received on the leaves and propose the "autumn-coloring-logical-time" that is the temporal indicator of autumn coloring, then we use experimental biological data to calibrate the model parameters. Using the leaf fractalities, we adopt a chaos game algorithm or random iteration algorithm to render natural autumn colorings.

1 はじめに

近年のコンピュータグラフィックス(CG)では雲、霧、樹木、炎など、自然現象に関するモデリング/レンダリングが盛んに行われている。本研究と関連深い樹木では、自然樹木の形状を生成するCGモデルの研究・開発が行われ、発展がとげられている[3]。しかし、これらの主たる目的は、樹木形状の発生メカニズムに置かれているため、季節感などの経時変化を表現するにはいたっていない。

そこで本研究では、季節感を感じさせるような景観の経時変化を表現する一例として、落葉広葉樹、とりわけカエデの紅葉をモデル化することを考える。千葉ら[2]は、紅葉の経時変化を植物色素の抽象的な変化モデルから試みている。本モデルでは、紅葉における生物学的要素を取り入れ、生物学者による実験データを必要に応じて用いることによって、紅葉の現実感を忠実に表現することを目指している。

紅葉における重要な環境要因として、日射量ととりあげ、樹冠内各葉の紅葉の進行具合をしめす紅葉論理時間を求める。それを指標とし生物学者が実験的に求めた植物色素の変化データを利用し紅葉の色彩経時変化を決める。また葉の形状、および葉上各点のカラー

分布をカオスゲームアルゴリズムを用いて決定し、一枚の紅葉の葉を表現する。その後一本の木全体の紅葉を表現することを目指す。

2 紅葉のメカニズム

2.1 葉中における紅葉発現プロセス

紅葉の色発現においては葉中のクロロフィル、カロチノイド、アントシアニンの色素が関係しており、それぞれ緑、黄、赤を示している。熟緑葉では赤色をしめすアントシアニンは合成されず、クロロフィル、カロチノイドが存在し、その量比はおおよそ8:1であると知られ、その結果クロロフィルの緑が優位に現れている[8]。

秋になり、夜間の温度が急激に下がると葉のつけ根に離層というコルク層の組織が作られる。この離層によって光合成によって作られた糖が葉から茎へと流出するのが妨げられ、葉中に糖が蓄えられる。そして、葉緑素であるクロロフィルが分解され、クロロフィルより分解速度がおそいカロチノイドの黄色が現れてくる。それと同時に同時に葉中の糖がアントシアニンを生成し赤色を発現していく[4]。

葉の紅葉因子として温度、光、水分などがあげられるが、温度、水分は紅葉現象が起こるための閾値的条件である[7]。そこで紅葉の色変化においては光合成によって生成される糖が重要な要因であることから、日射量を主な環境因子とした生物学的モデルに基づいた紅葉のモデリングを行う。

† 筑波大学システム情報工学研究所
Institute of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
‡ 筑波大学 電子情報工学系
Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba

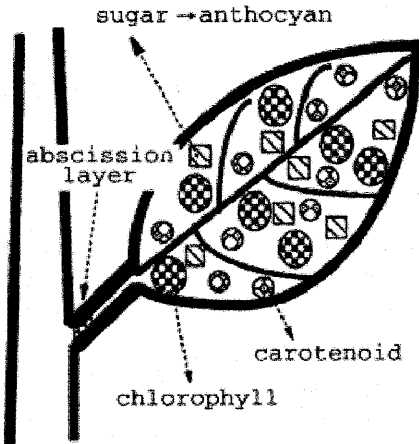


図1: 紅葉のメカニズム

3 紅葉モデル

3.1 生物学的紅葉モデル

葉上における紅葉発現プロセスの主なる要素として、“エイジング”と“植物色素の配合変化”が考えられる。この2つにはお互いに密接に関係があるが、これらを主に制御しているのは各葉がうける累積日射量だと考えられる。

エイジングとは生物学では加齢と訳され、葉の成長度合を示す指標である。葉を上面から観察すると紅葉は主要な葉脈より最も離れた位置である輪郭部、先端部から始まり内側、枝に近い方へ進んで行くことが分かる。

このように、葉のエイジングは先端に進むほど高くなり、蓄積される糖の量も多くなる。ゆえに蓄積糖から生成されるアントシアニンもエイジングに従って多くなる。このような蓄積糖は光合成によって生成されるため、累積日射量と大きな関係があることが考えられる。

実際の紅葉では葉全体が暗緑赤色に変色した後、しだいに赤色部がエイジングに基づいて内側に向かって広がっていき、大部分のクロロフィル分解され退色したところで鮮やかな赤となる。石倉はこの紅葉過程を表1のような7段階に分類している [5]。

また石倉はこの紅葉過程により、色変化と葉の部位の関係を明らかにしたばかりではなく、その各段階における植物色素と生成糖の量を実験から具体的に図2のように示している [6]。

本研究では、太陽の軌道計算を行い累積日射量を計算する。その累積日射量の度合から紅葉の進度指標と

段階	葉上の様子
1	緑色
2	葉脈の所々が暗緑赤色
3	葉脈緑を除く葉のおおよそ半分が暗緑赤色
4	葉脈緑を除く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

表1: 石倉の紅葉過程の分類

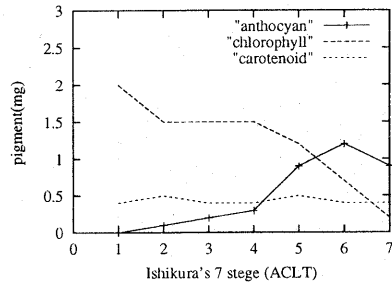


図2: 石倉の7段階と各色素量

なる紅葉論理時間を定め、それを石倉の7段階に当てはめる。それにより植物色素の実験データからCGのカラー値を求めることができる。

3.2 日射量計算モデル

3.2.1 日射について

太陽の日射(短波放射)は、直達日射、天空散乱日射、地表反射日射があげられるが、天空散乱日射、地表反射日射については光合成を行える程の光エネルギーを直達日射もたず、ほどまた計算も困難であるため、本論文では、直達日射について算出する。

3.2.2 太陽の運行経路

ここでは具体的な太陽の運行経路計算の方法について説明する。海上保安庁水路部による太陽系天体位置略算式を利用する [10]。これにより、任意の場所、日時における太陽の赤道直角座標を求めることができる。得られた太陽の赤道直角座標を (L, M, N) は地平直角座標 (l, m, n) に対して、文献により次の変換式が与えられる [9]。

$$\begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \varphi & 0 & -\cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix}$$

式中の φ, Θ は観測点の緯度、恒星時である。

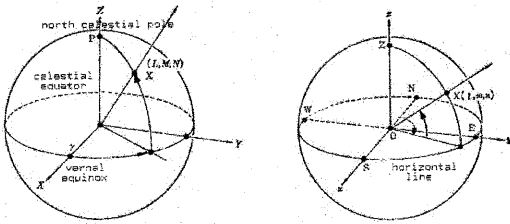


図3: 赤道直角座標と地平直角座標

3.2.3 各葉が受ける日射量計算

前項で得られた太陽の運行経路をもとに、各葉が受ける日射量を計算する。太陽が天球上のある点にあるときの単位時間あたりの日射量は、葉の法線ベクトルを \vec{L} 、太陽の光線ベクトルを \vec{S} 、太陽からの入射光の強さ I とすると、

$$I(\vec{L} \cdot \vec{S})$$

で与えられるので、累積日射量は

$$\sum_i^N I(\vec{L} \cdot \vec{S}_i)$$

で得られる。

3.3 紅葉論理時間モデル

求めた日射量をもとに紅葉の進捗指標となる紅葉論理時間を設ける。

$$\text{紅葉論理時間} \tau = f_1(\text{累積日射量})$$

という風に考える。ここで累積日射量は葉の開葉時を $t = 0$ とした時間 t 、葉の座標を (x, y, z) としたとき前項から

$$\text{紅葉論理時間} \tau = f_2(t, x, y, z)$$

の関係を持つことがわかる。この結果、紅葉論理時間が葉1枚の紅葉変化の指標となると同時に、葉同士の相対的位置の差による紅葉変化の差の指標ともなる。

4 紅葉の葉のフラクタル性

自然界に多くのフラクタル性があり、カエデもまた葉や葉脈にフラクタル性が見られる。そこで本研究では Barnsley[1] のカエデの葉を用いる。Barnsley のカエデは Iterated Function System (IFS) のアトラクターであり、カオスゲームアルゴリズムを用いて描画していく。カエデの葉を生成するための IFS は4つの縮小写像からなり、アフィン変換を

$$w_i = \begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ f_i \end{pmatrix}$$

	a	b	c	d	e	f
w_1	0.8	0	0	0.8	0.1	0.06
w_2	0.5	0	0	0.5	0.25	0.465
w_3	0.355	-0.355	0.355	0.355	0.266	0.078
w_4	0.355	0.355	-0.355	0.355	0.378	0.434

表2: 葉の画像のアフィン変換パラメータ

としたとき、4つの縮小変換のパラメータは表2のようになる。

ここで、 w_i の出現確率および対応する描点の色を変えることによって幾何形状を変えることなく、表情を変えることができる。

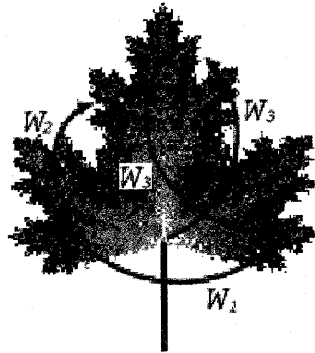


図4: カオスゲームアルゴリズムによる葉

5 実行結果

本研究での実行結果を図5、図6に示す。図5は一枚の紅葉の時間変化の一例である。エイジングが進みながら次第に全体的に葉が色づき赤くなって様子が表れている。図6は南東方向を向いた枝についた紅葉を4つの時系列にわけて表示している。各葉とも同一平面上にあるが上部の葉や枝の影になり受ける日射量が減少することを仮定し主枝の根本に箱において計算している。そのため、枝の根本側、内側において自然に紅葉進捗がおくれている様子が表れている。

6 まとめと今後の課題

本研究では季節感を感じるような経時変化の一例としてカエデの紅葉を表現した。実際の紅葉の色彩経時変化を表現することを目指し、各葉において葉が受ける日射量を計算し生物学者の植物色素の実験的変遷データを用いて色彩変化率を決めた。また実際の紅葉

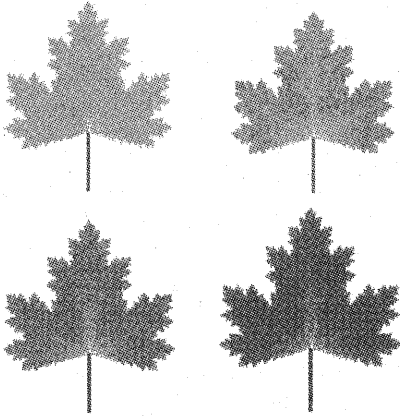


図 5: 1 枚の紅葉の時間変化の例

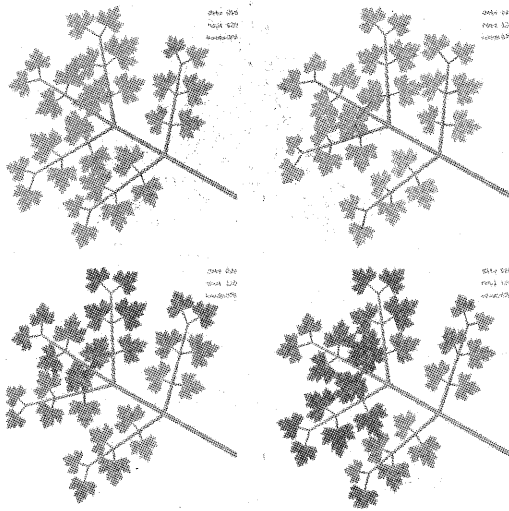


図 6: 南東方位の紅葉の時間変化

の葉にみられるような葉の形やエイジングのフラクタル性に着目しカオスゲームアルゴリズムを用いて表現した。

紅葉の因子として、日射量や温度といった環境因子は決定論的因子として定め計算することは容易である。しかし、各葉の離層の成長度やどのくらいの葉の蓄積糖が枝や幹に流れ、どのくらい葉に残るかという因子は、やはり紅葉の進度を決める重要な因子であるが、これらはそれぞれの葉における温度や日射量などの環境因子の差だけでは決められず、ゆらぎによって変化することが容易に予想され非決定的因子としてあげられる。これらを考慮せずに1本の樹木全体の紅葉画像を図7を示すが、あまり自然とは見えていない。

そのような非決定的要素をどのように扱っていくかを今後の課題とし、また逐次落葉していく様子を表現することを目指したい。

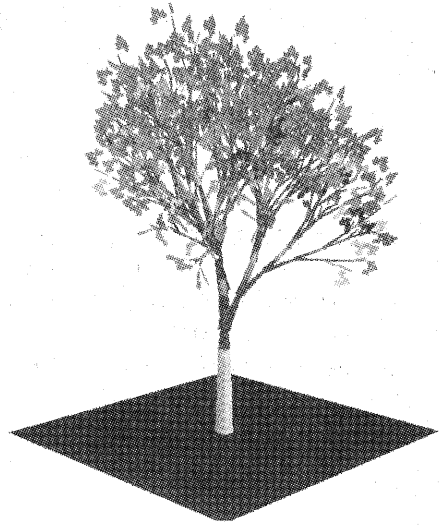


図 7: 非決定的因子を考慮しない紅葉

参考文献

- [1] M. Barnsley. *Fractals everywhere*. Academic Press, 1988.
- [2] N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka, and N. Saito. Visual simulation of leaf arrangement and autumn colours. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 7, pp. 79-93, 1996.
- [3] Przemyslaw Prusinkiwicz and Aristid Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag, 1990.
- [4] 清水清. 人工紅葉. 植物と自然, Vol. 17, No. 11, pp. 7-9, 1983.
- [5] 石倉成行. カエデ科植物の紅葉. 植物と自然, Vol. 7, No. 10, pp. 17-20, 1973.
- [6] 石倉成行. 紅葉の生理科学. 植物と自然, Vol. 13, No. 11, pp. 32-35, 1979.
- [7] 大井次郎. カエデの形. 誠文堂新光社, 1968.
- [8] 大谷俊二. 紅葉の化学. 化学と生物, Vol. 23, No. 11, pp. 701-708, 1985.
- [9] 長沢工. 天体の位置計算 増補版. 地人書館, 1985.
- [10] 暦計算研究会 (編). 新こよみ便利帳. 恒星社厚生閣, 1991.