

修 士 論 文

光環境を考慮した樹木生長モデリング

350504369      吉澤 大輔

名古屋大学大学院情報科学研究科

複雑系科学専攻

2007年1月

# 目次

<b>第1章 緒論</b>	<b>2</b>
1.1 研究背景・目的	2
1.2 作成モデルについて	3
<b>第2章 生長モデル</b>	<b>4</b>
2.1 分枝モデル	4
2.2 パイプモデル	6
2.3 光環境モデル	7
2.3.1 光の強さと向き	7
2.3.2 周辺環境のモデル化	8
2.3.3 光屈性	10
2.3.4 避陰反応	10
2.3.5 枝の枯死	12
<b>第3章 結果・考察</b>	<b>13</b>
3.1 樹木モデル	13
3.2 遺伝的な違い	16
3.2.1 分枝角による違い	16
3.2.2 枝の長さによる違い	16
3.2.3 枯死閾値による違い	16
3.2.4 光屈性の強さによる違い	21
3.2.5 光強度比による違い	21
3.2.6 葉球半径による違い	21
3.2.7 避陰反応における伸張生長による違い	25
3.2.8 避陰反応の閾値による違い	25
3.2.9 葉序による違い	25
3.3 環境の違い	29
3.3.1 2本の樹木	29
3.3.2 複数本の樹木	31
3.3.3 光遮蔽物が存在する環境の樹木	33
3.3.4 斜面で生長する樹木	34
<b>第4章 結論</b>	<b>35</b>

# 第 1 章 緒論

## 1. 1 研究背景・目的

自然界に存在する樹木や街でみることのできる街路樹などは、一つとして同じ形をしたものがなく、ランダムに枝を生長させているようにみえる。しかし、樹木は生育環境に適応し柔軟に形を変えて生長している。そして、形を変え生長している樹木でも、その枝ぶりから樹種を特定することも可能である。仮に全く同じ遺伝形質を持つ樹木であっても、環境が異なれば同じ樹形をつくることはなく、また逆もいえる。つまり、樹木の形はその樹木がとりうる形の限界である遺伝的形質とその範囲内で樹木がとるべき形を決める環境の相互作用の結果によるものであるといえる。

庭園や公園、街路樹の並木など、自然景観をコンピュータグラフィックスによって再現するとき、単に規則的に同一形状の樹木を並べるだけでは、再現された景観は不自然なものとなってしまう。そこで、自然な景観を再現するために、生育環境に適応して生長する多様な樹木を表現するための手法が必要となる。つまり、樹木によって異なる遺伝形質を持つこと、生育環境の違いによって異なる樹形を持つことにより、自然に近い景観の再現が可能となる。

これまでもいくつかの生長モデルが提案されており、それらは大きく

- (1) 環境の影響を考慮していないモデル
- (2) 環境の影響を考慮したモデル

に分けられる。(1)の環境の影響を考慮しないモデルでは、あらかじめ定められた枝の分枝角度や枝の長さなどのパラメータや乱数などによって、樹木の生長が決定される。そのため、この手法で生成された樹形は遺伝的に定まるような樹形を表現することができるが、周囲の環境に適応して変化した樹形を得ることはできない。これに対して(2)の環境の影響を考慮したモデルでは、光、重力、風などによって、樹形を変化させ、樹木が生成される。特に光環境を利用したモデルでは、枝の先端における光屈性を仮定することで樹幹の形成や枝垂れ現象、受光量不足による枝の枯死などが表現できており、環境の影響を考慮しないモデルと比べて、より自然な樹形の生成が可能となっている。

本論文では、樹木自体と建物や地形などの周囲の環境が織り成す光環境を考慮することで、現実に樹木が存在する周囲の環境をモデル化し、環境に適応して生長する樹形の多様性を表現する。

## 1. 2 作成モデルについて

樹木の生長には、新しい枝の発生である分枝の他に、枝の長さを伸ばす伸張生長と枝を太くする肥大生長がある。伸張生長は寿命の3分の1程度で生長が平衡に達するのに対し、肥大生長は樹木が枯れるまで衰えることなく生長をする。本研究では、多様な樹形の形成を目的としているため、分枝回数、伸張生長、肥大生長それぞれと樹木の樹齢の関係については考えないこととする。

## 第2章 生長モデル

本章では、本論文で作成する樹木モデルにおいて、伸張生長を表現する分枝モデル、肥大生長を表現するパイプモデル、環境への適応を表現する光環境モデルについて説明する。

### 2.1 分枝モデル

樹木は枝の分枝によって形作られ、枝は分枝点である節によって区切ることができる。節はもともと葉がついていた部分であり、節から節を枝の単位と考える。そして、節から新しい枝の単位ができることによって樹木としての生長を表現する。

樹木には様々な分枝の仕方があり、その違いが樹形に大きく影響を及ぼし、樹種によって異なる特徴的な樹形を形作っている。分枝の仕方には、中心となる主軸の枝をもち、側方に枝が出る側方分枝（単軸分枝）と、二股に分かれた一方の枝があまり伸びないために2本の枝の間に主軸が生じる仮軸分枝とに分けることができる。

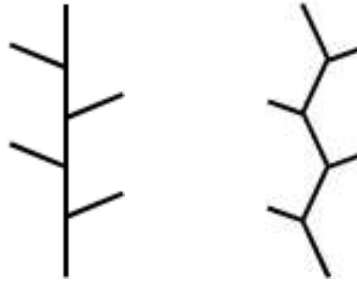


図 2.1：側方分枝と仮軸分枝

葉の配列（葉序）には規則性があり、枝につく葉の数が1枚ならば互生葉序、2枚以上ならば輪生葉序と呼ばれている。互生葉序では、ある節の葉とその次の節の葉が枝を中心に一定の角度をもつ。この角度を葉序の開度（divergence）という。互生葉序の種類には、 $1/2$ 、 $1/3$ 、 $2/5$ 、 $3/8$ 、 $5/13$ 、…がある。

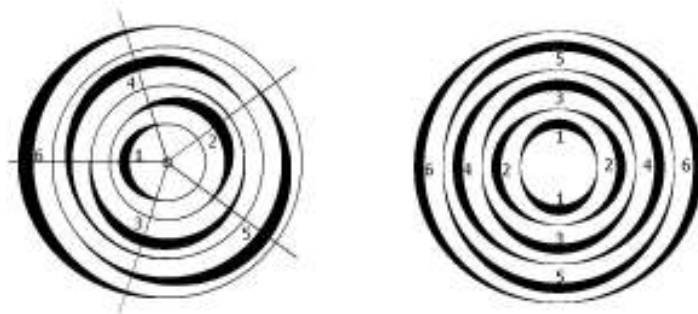


図 2.2 : 互生葉序 (2/5 葉序) と輪生葉序 (互生対生葉序)

本論文では，初期状態として定める鉛直上向きの 1 本の枝を親枝として，親枝をもとに子枝，子枝をもとに孫枝を生成することを繰り返す 2 分枝構造でモデルを作成する．そして，側方分枝と葉序の特徴を考慮し，親枝の延長上と親枝の軸に対して  $\theta$  度で輪生する形で 2 本の子枝に分枝するモデルを用いる．

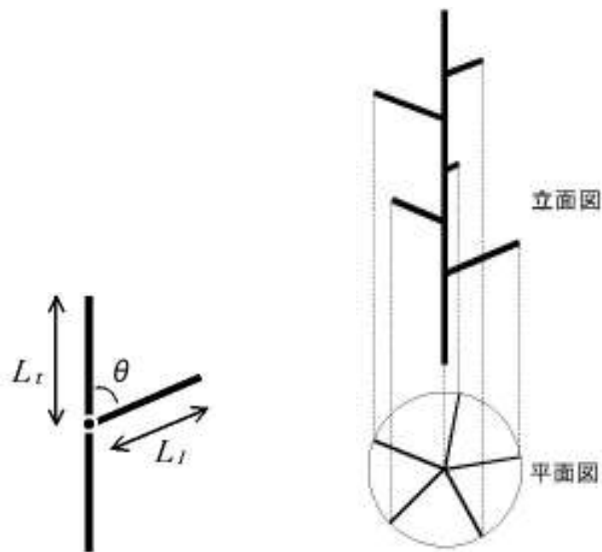


図 2.3 : 分枝モデル (2/5 葉序)

## 2. 2 パイプモデル

枝の太さは、樹形自体には関係ないが、樹木らしさを視覚的に表現するためには重要な要素となる。枝には、葉の重量に応じた力学的支持組織と葉の蒸散量に応じた通導組織の機能がある。つまり、枝の断面積はそれが支える葉の量と相関関係がある。本論文では、枝の肥大生長の表現として子枝の断面積の総和が親枝の断面積と等しいパイプモデルを用いる。

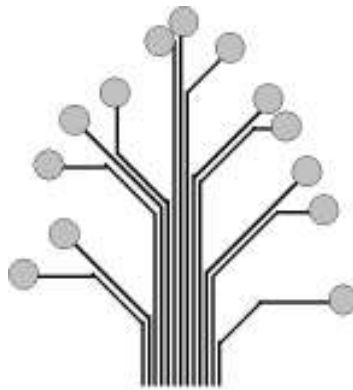


図 2.4 : パイプモデル

## 2. 3 光環境モデル

樹木の生長モデルにおいて、樹木の生長に大きな影響を及ぼしている光環境を考慮することは重要である。光環境を考慮することで、受光量不足による枝の枯死や枝が光の強い方向に向かって生長する光屈性の再現が可能となる。

本節では、千葉ら[2]が提案した、葉を葉球という遮光球で近似する方法と、本論文で提案する周辺環境のモデル化とを組み合わせた光環境モデルについて説明する。また、樹木が光の強い方向に向かって生長する性質である光屈性、他の樹木の陰に入った樹木が示す避陰反応、および、受光量不足による枝の枯死、についても説明する。

### 2. 3. 1 光の強さと向き

光環境を考慮するために、樹木が受ける光の強さと向きを求める。

葉を葉球とよばれる遮光球で近似する方法[2]で求められる、受光量と受光ベクトルを光の強さとその向きとする。受光量と受光ベクトルの求め方は次のとおりである。

一つの枝につく葉群を葉球と呼ぶ球で近似する。その葉球を中心とする天球を考え、経度方向( $h = 1, \dots, H$ )と緯度方向( $v = 1, \dots, V$ )に均等に分割し、単位面積あたりの光の強さ  $B_0(h, v)$  を与える。光の強さは、上半球( $v = 1, \dots, V/2$ )を直接光  $C_1$ 、下半球( $v = V/2 + 1, \dots, V$ )を間接光  $C_2$  とそれぞれ等しくする。また、単位面積あたりの間接光に対する直接光の強さを表す比を光の強度比  $C$  とする。葉球から分割した区画の中心に向かうベクトルが、他の葉球と交差するとき一定の減衰率  $\alpha_l$  でその方向から受ける光を減少させる。



図 2.5 : 天球



$$B_0(h, v) = \begin{cases} C_1 & (v=1, \dots, \frac{V}{2}) \\ C_2 & (v=\frac{V}{2}+1, \dots, V) \end{cases} \quad \text{式 2.1}$$

$$C = \frac{C_1}{C_2} \quad \text{式 2.2}$$

ベクトル方向から受ける光の量  $B(h, v)$  とその区画の面積  $S(h, v)$  との積をその区画が受ける光の量とし、それぞれの区画で受ける光の量の総和を葉球の受光量とする。また、葉球からそれぞれの区画に向かう単位ベクトル  $N(h, v)$  にその区画で受ける光の量で重み付けした総和を受光ベクトルとする。受光量は、葉に到達する光の総量を表し、受光ベクトルは光の到達する平均的な方向を表している。

$$\text{葉球の受光量} = \frac{\sum_h \sum_v B(h, v) S(h, v)}{\sum_h \sum_v B_0(h, v) S(h, v)} \quad \text{式 2.3}$$

$$\text{葉球の受光ベクトル} = \frac{\sum_h \sum_v N(h, v) B(h, v) S(h, v)}{\left| \sum_h \sum_v N(h, v) B(h, v) S(h, v) \right|} \quad \text{式 2.4}$$

### 2. 3. 2 周辺環境のモデル化

既存の光環境モデルは、上半球と下半球にわけて全ての方向から光が得られる理想的な環境である。しかし、現実的にはそのような理想的な環境であることはほとんどなく、地形や建物などの人工物などが存在しており、樹木周辺の環境光の変化が樹木の生長に影響を及ぼしている。

本論文では、周囲環境のモデル化を行い、既存の光環境モデルと組み合わせることにより、現実に近い光環境を構築する。本節では、環境モデル化にあたって、 $x-y$  平面を水平面と平行と考え、鉛直方向を  $z$  軸と考える。

まず、作成するモデルの周囲を  $x$  方向と  $y$  方向を均一に分割した四角形メッシュを作成する。格子点の  $z$  軸方向の大きさがその地点での高さを示すことになる。そして、各格子点上で、葉球と同様の受光量の計算を上半球のみ行い、格子点の受光量を求める。この受光量が格子点で反射する光の量とし、環境光の強さを示すこととする。

次に、葉球の受光量を計算するときに用いられる  $N(h, v)$  を延長した半直線が、四角

形メッシュと交差したときに，交差点の近接 2 格子点で補間を行い，交差点の環境光の強さとする．そして，環境光の強さで光の量を重み付けすることにより，周囲の環境を含む光環境を表現する．ただし，交差点を持つ場合は，上半球の光の量も間接光と等しくする．

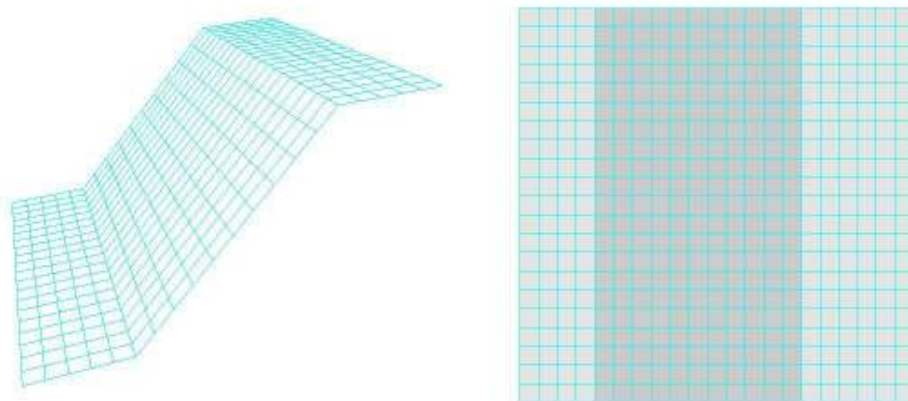


図 2.6 : 光環境モデル化の例 (斜面)

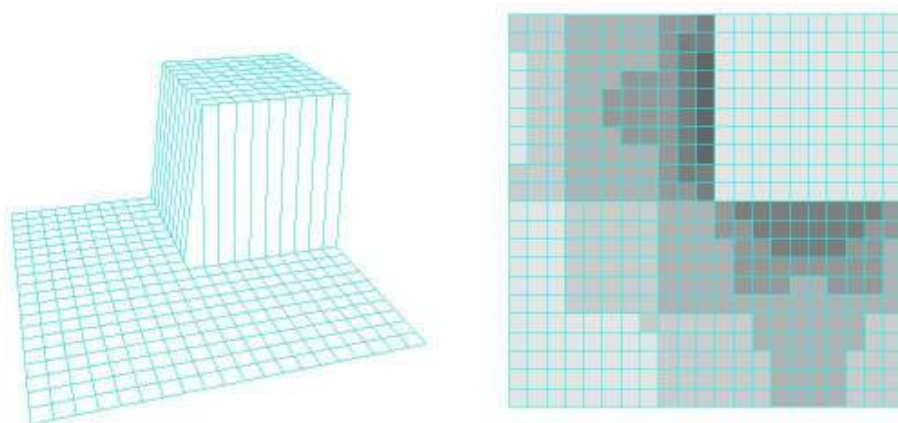


図 2.7 : 光環境モデル化の例 (建物)

### 2. 3. 3 光屈性

光屈性とは、樹木が光の強い方向へ生長する性質のことである。本論文では、千葉ら[2]の提案した、葉に対して平均的に最も光が到達する方向に枝先の向きを修正する方法を用いる。

式 2 で求められる受光ベクトルの向きに枝先の向きを一定の割合  $H$  で回転させることにより光屈性を実現する。 $H = 0.0$  で光屈性の効果はなく、図 2.3 の分枝を再現し、 $H = 1.0$  で枝先の向きは受光ベクトルと一致する。

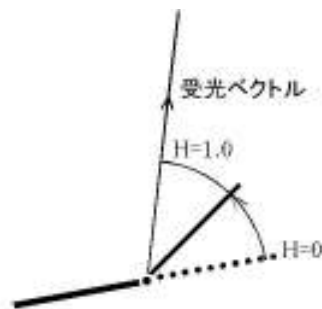


図 2.8 : 光屈性の実現

### 2. 3. 4 避陰反応

避陰反応とは、他の植物の陰に入ってしまった場合、枝の伸張を促進させてその陰から抜け出し、よりよい光環境を得ようとする反応である。他の植物がつくる陰では、葉により赤色光が吸収され、赤色光成分（660nm 前後）の遠赤色光成分（730nm 前後）に対する量が減少するため、この避陰反応が起こる。

本論文では、式 2.2 の受光量の求め方を利用して、葉を通過した時に赤色光の減衰率  $\alpha_r$  と遠赤色光の減衰率  $\alpha_{fr}$  として、対応する受光量を計算する。そして、赤色光と遠赤色光に対応する受光量の比と閾値  $T_{r/fr}$  を比較することで反応が起こる条件を考える。多くの葉を通過した光は、受光量比が低下するため、避陰反応が起こる。

$$\frac{\text{赤色光の受光量}}{\text{遠赤色光の受光量}} < T_{r/fr} \cdots \text{避陰反応} \quad \text{式 2.5}$$

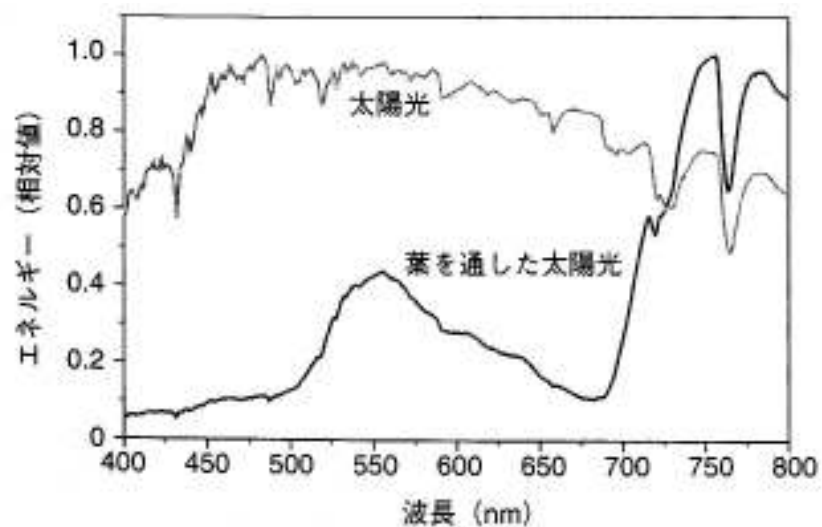


図 2.9 : 葉の吸収スペクトル[6]

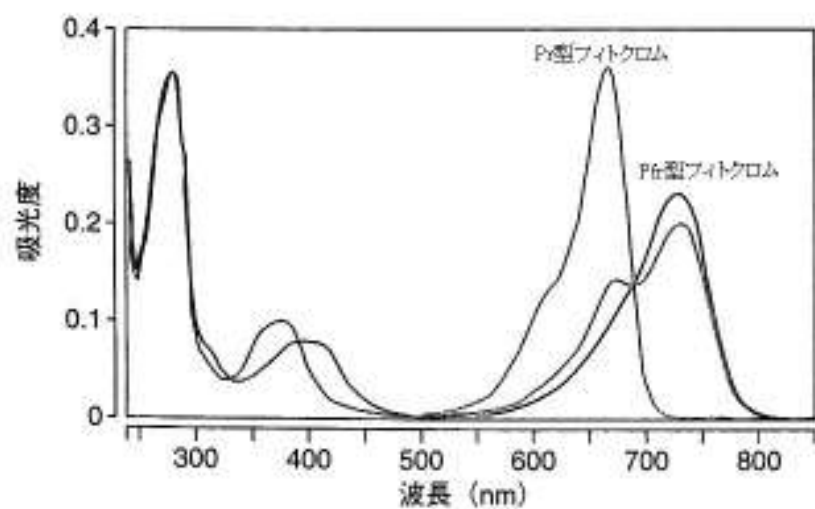


図 2.10 : フィトクロムの吸収スペクトル[6]

フィトクロム：赤・遠赤色光可逆的反応の光受容体。赤色光（660nm）を吸収する Pr 型と遠赤色光（730nm）の 2 つの安定型が存在し、様々な生理過程（種子発芽や避陰反応など）に関与。

反応は，図 2.3 の分枝モデルにおいて，輪生する側枝を短くし，親枝延長上の枝を長くすることで表現する．

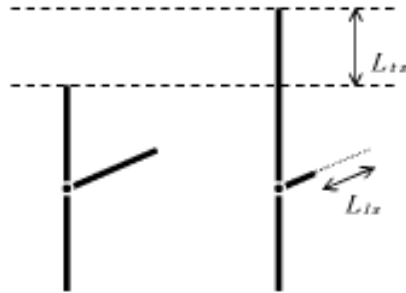


図 2.10：避陰反応による分枝モデルの変化

### 2. 3. 5 枝の枯死

樹木は光合成で得られるエネルギーで生長している．つまり，十分な光の獲得がなければ，樹木は生長することができない．また，各枝のエネルギー収支は独立しており，得られるエネルギーが他の枝に利用されることはない．

本論文では，式 1 で求められる葉球の受光量と枯死閾値  $T_D$  を比較することによって，その枝の枯死と生存を決定する．生存した枝は子枝を生成し，枯死した枝は枯れ落ちる．分枝した 2 本の子枝が枯れ落ちた親枝も枯れ落ちる．

$$\text{葉球の受光量} < T_D \cdots \cdots \text{枯死} \quad \text{式 2.6}$$

$$\text{葉球の受光量} \geq T_D \cdots \cdots \text{生存} \quad \text{式 2.7}$$

## 第3章 結果・考察

本章では，前章の手法によって表現できる樹形の例を示す．

### 3.1 樹木モデル

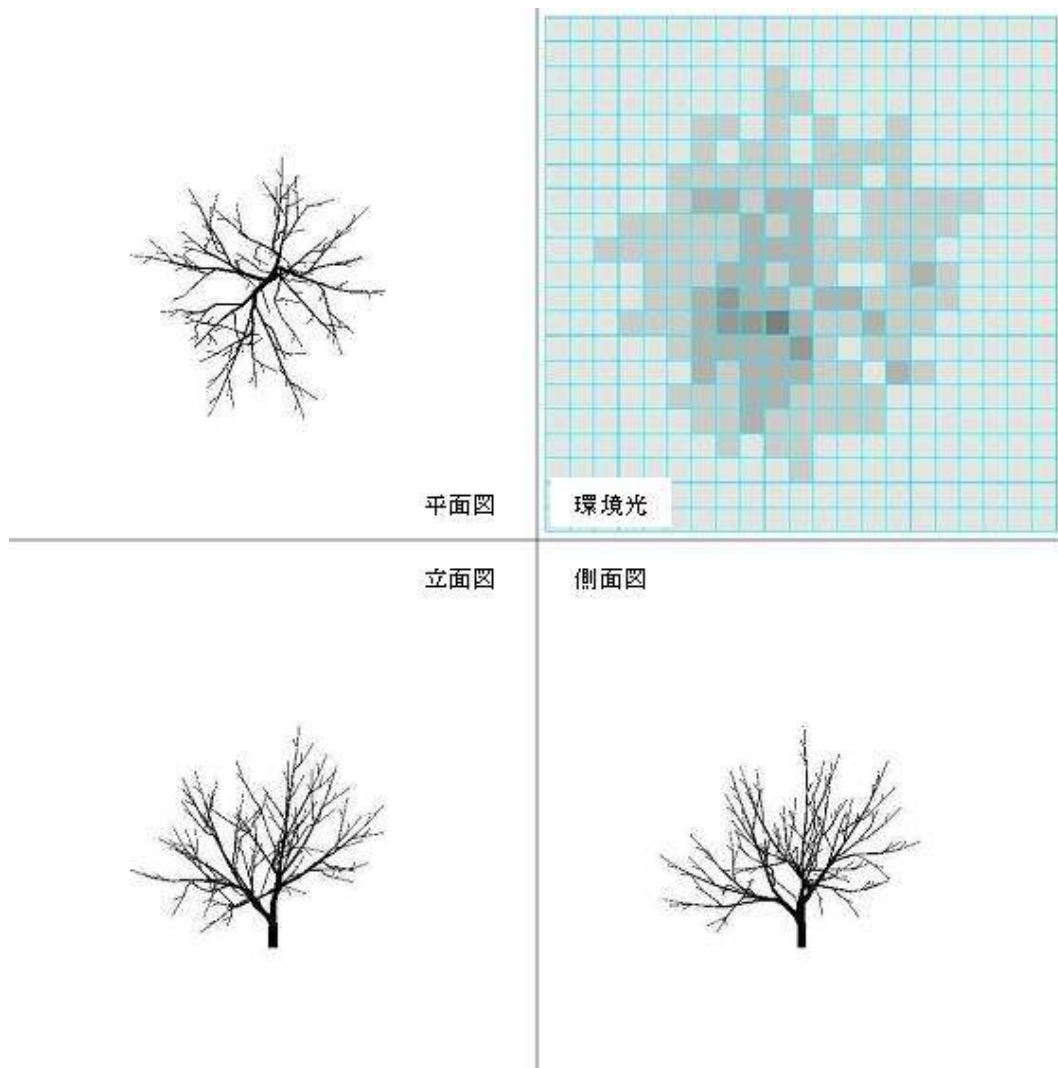


図 3.1 : 基本的な樹木モデル

本章では，特に断りがない限り表 3.1 のパラメータ値でモデルを作成するものとする．

パラメータ	記号	値
世代 .....	$G$	10
分枝角 .....	$\theta$	60
枝の長さ .....	$L_t, L_l$	4, 8
光屈性 .....	$H$	0.4
光強度 .....	$C$	3/2
葉球半径 .....	$R$	4
光減衰率 .....	$\alpha_l$	0.3
赤色光減衰率 .....	$\alpha_r$	0.3
遠赤色光減衰率 .....	$\alpha_{fr}$	0.7
枯死閾値 .....	$T_D$	0.2
避陰反応 .....	$L_{ts} = L_{ls}$	4
避陰反応閾値 .....	$T_{r/fr}$	0.5
葉序 .....	$Div$	5/8

表 3.1 : 図 3.1 のパラメータ値

枝の長さや葉球半径などの長さを示すパラメータは，同一尺度による値の大きさである．避陰反応は伸張生長のためのエネルギーを分配する方法と考え， $L_{ts} = L_{ls}$  とする．赤色光減衰率と遠赤色光減衰率は図 2.9 と図 2.10 をもとに定めている．また，光合成に利用される光は赤色光と同じ波長であるため， $\alpha_l = \alpha_r$  としている．

本論文では， $x-y$  平面を  $20 \times 20$  に分割した四角形メッシュマップを用いて，周囲の環境を作成し，環境光の計算を行う．また，天球の分割数を緯線方向に 10，経線方向に 10 として受光量の計算を行う．

一本の樹木モデルを作成するときにかかる計算時間は、Pentium4 の 2.8GHz のコンピュータを用いて

0 世代	計算時間	=	218 msec
1 世代	計算時間	=	390 msec
2 世代	計算時間	=	578 msec
3 世代	計算時間	=	765 msec
4 世代	計算時間	=	984 msec
5 世代	計算時間	=	1250 msec
6 世代	計算時間	=	1625 msec
7 世代	計算時間	=	2125 msec
8 世代	計算時間	=	2968 msec
9 世代	計算時間	=	4281 msec
10 世代	計算時間	=	6343 msec

となり，一本の樹木を作成するのに約 6 秒必要とする．0 世代時には，初期状態の環境光の強さを計算している．



### 3. 2 遺伝的な違い

本節では、樹木の遺伝的要素を変更したときの樹形の変化を具体的にいくつかの例を用いて説明する。

#### 3. 2. 1 分枝角による違い

分枝角の違いによる樹形の違いを図 3.2 に示す。

(a) 分枝角が小さいと、上へ向かって生長する傾向がみられる。枝が集中するため、枝の分布密度は疎になる。

(b) (c) (d) 横へ拡がりが見られる。分枝角が大きくなるにつれ、枝の主軸と側枝のはっきりする傾向があり、異なる拡がり方をみせている。特に (d) は、中心に主軸を形成しており、主軸から拡がる樹形がみられる。

#### 3. 2. 2 枝の長さによる違い

主軸の長さの違いによる樹形の変化を図 3.3 に、側枝の長さの違いによる樹形の変化を図 3.4 に示す。

(a) (b) 主軸が短いと樹高が低く、横へ拡がる傾向がある。枝垂れもみられる。

(c) (d) 主軸が長くなると、横への拡がりをみせているが、上へ向かっての生長の方が著しく樹高が高くなる。主軸が長いほど円錐形に近い樹冠を形成する。

(e) (f) 側枝が短いと枝の分布密度が疎になる。

(g) (h) 側枝が長いと枝の分布は密になり、丸み帯びた樹冠を形成する。主軸の長さと異なり、側枝は長くなっても、樹高に及ぼす影響は小さい。

#### 3. 2. 3 枯死閾値による違い

枯死閾値の違いによる樹形の変化を図 3.5 に示す。

(a) 枯死閾値が小さいと、多くの枝が枯れることなく残り、枝が密に存在する。そのため、自らの枝で避陰反応をおこし、上、横へ拡がって生長している。

(d) 枯死閾値が大きいため、ほとんどの枝が枯れ落ちている。残った枝は、横に拡がり生長している。

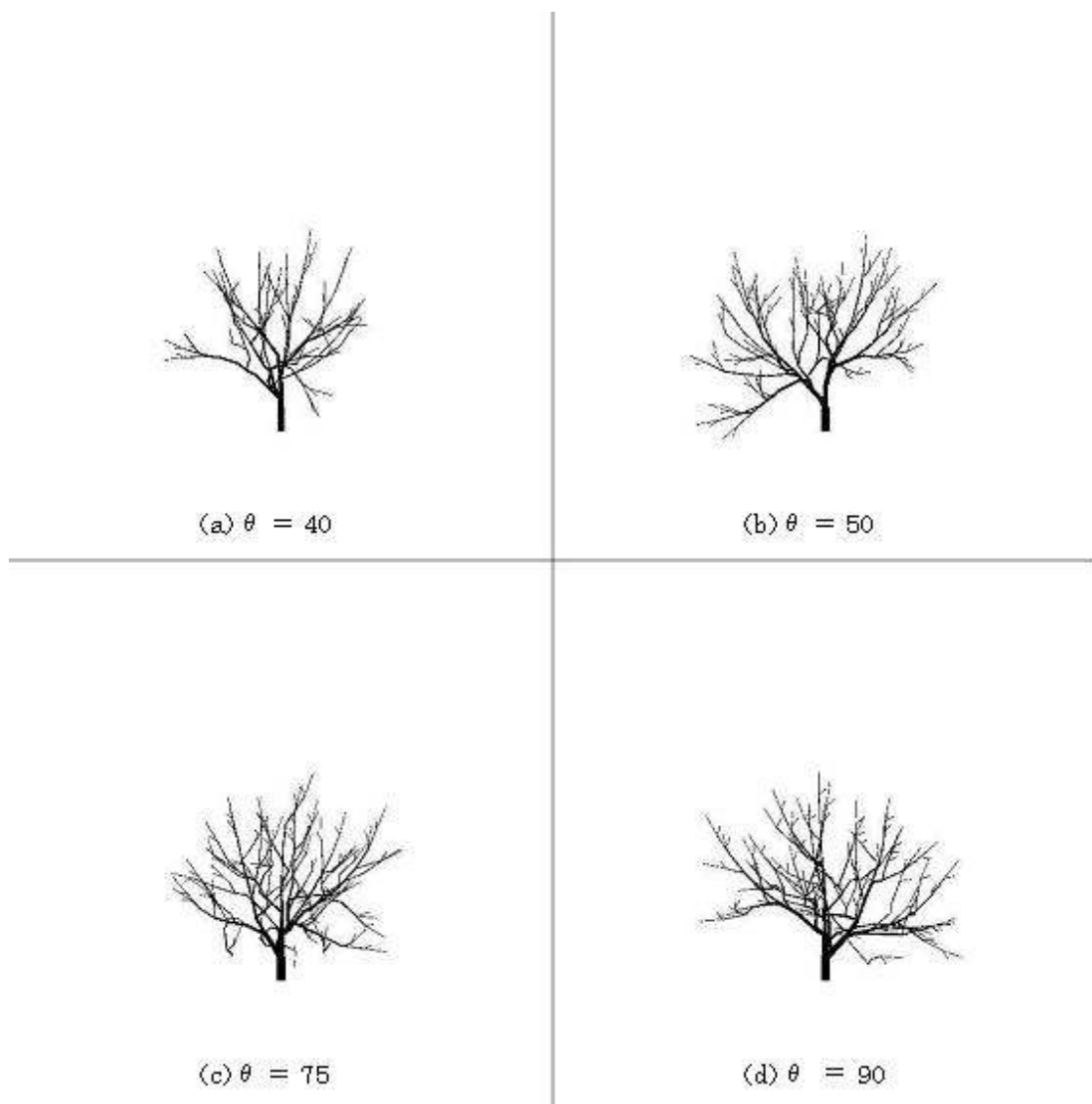


図 3.2 : 分枝角の違いによる樹形の変化

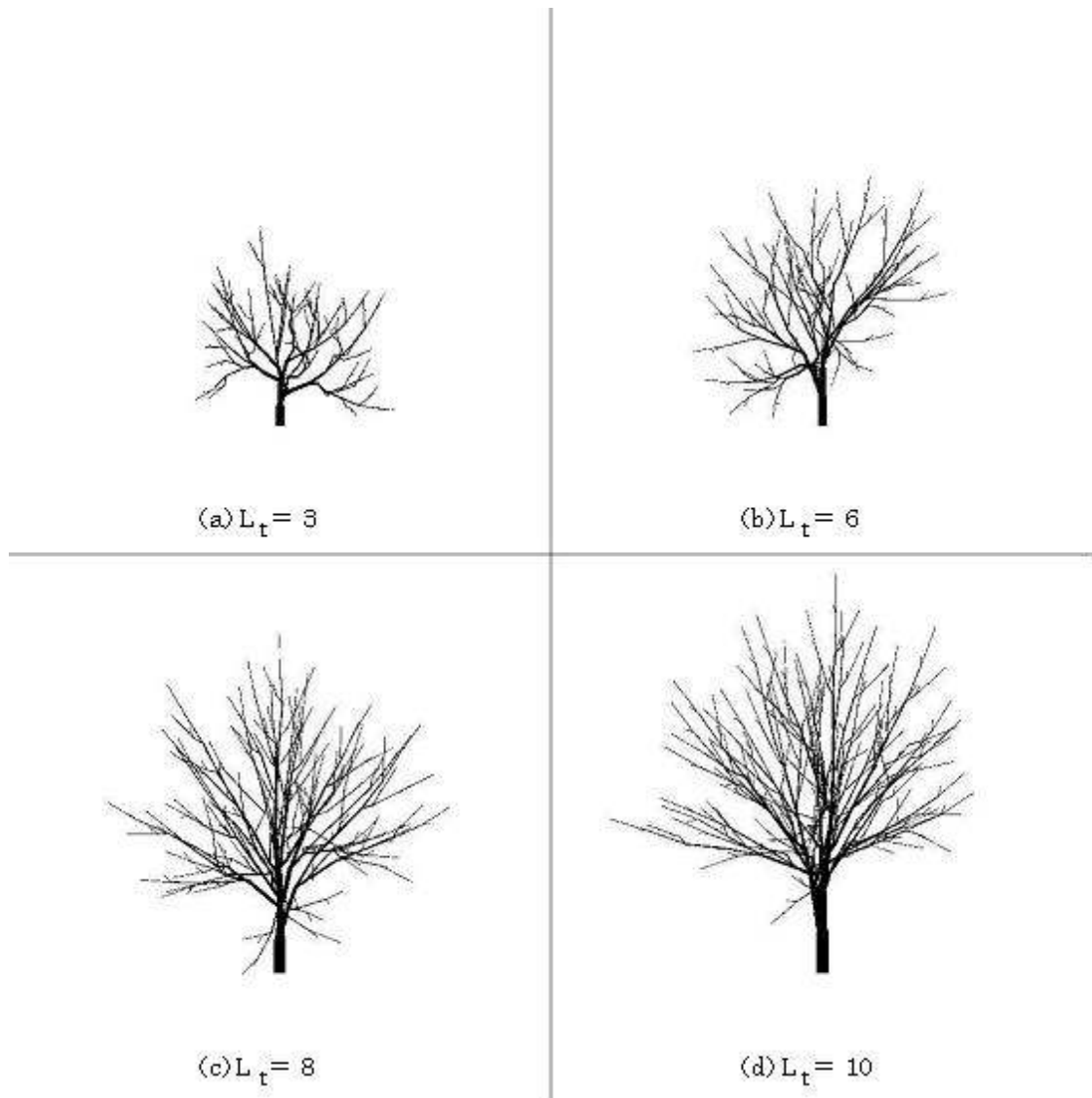


図 3.3 : 主軸の長さの違いによる樹形の変化

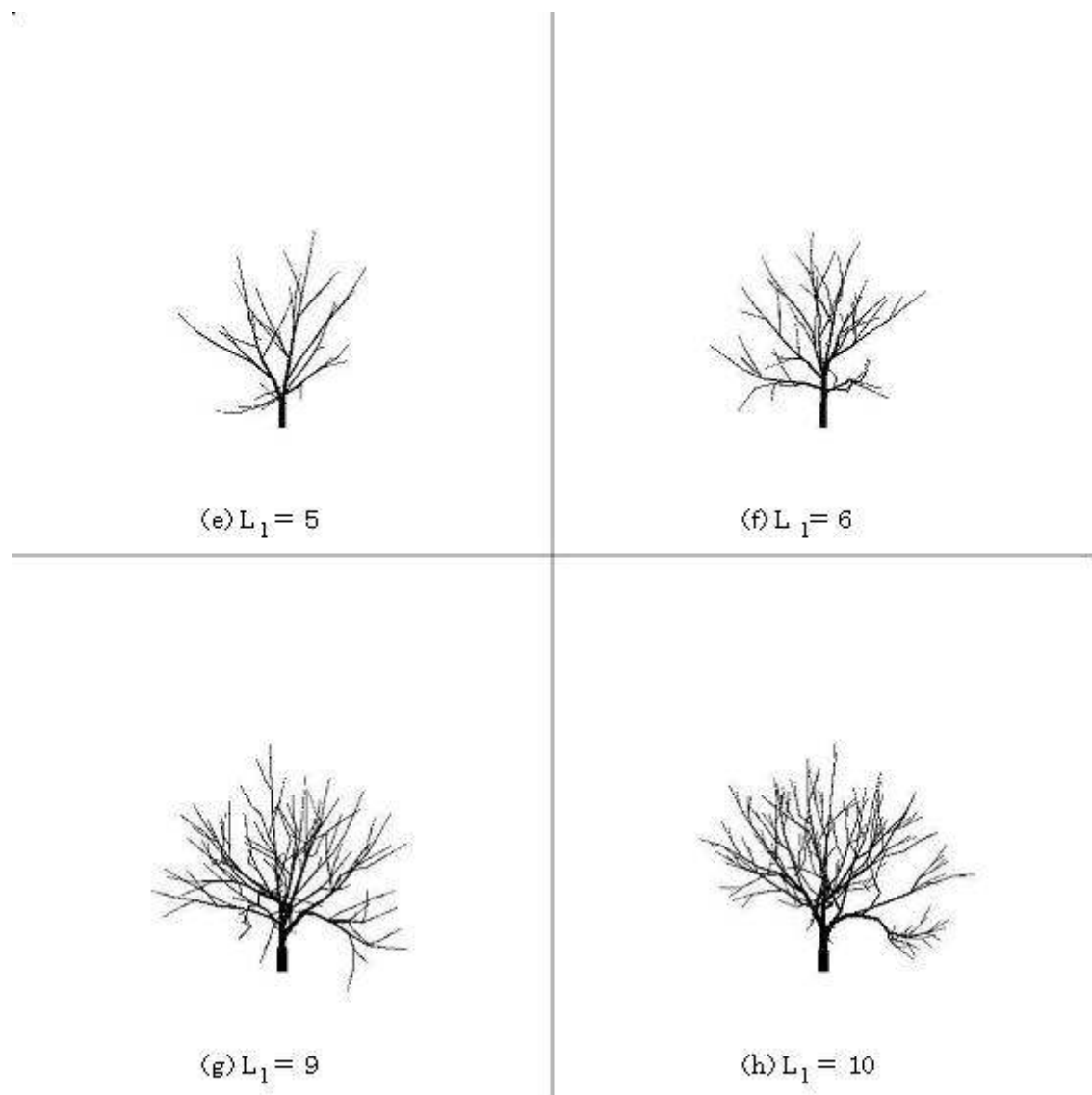


図 3.4 : 側枝の長さの違いによる樹形の変化

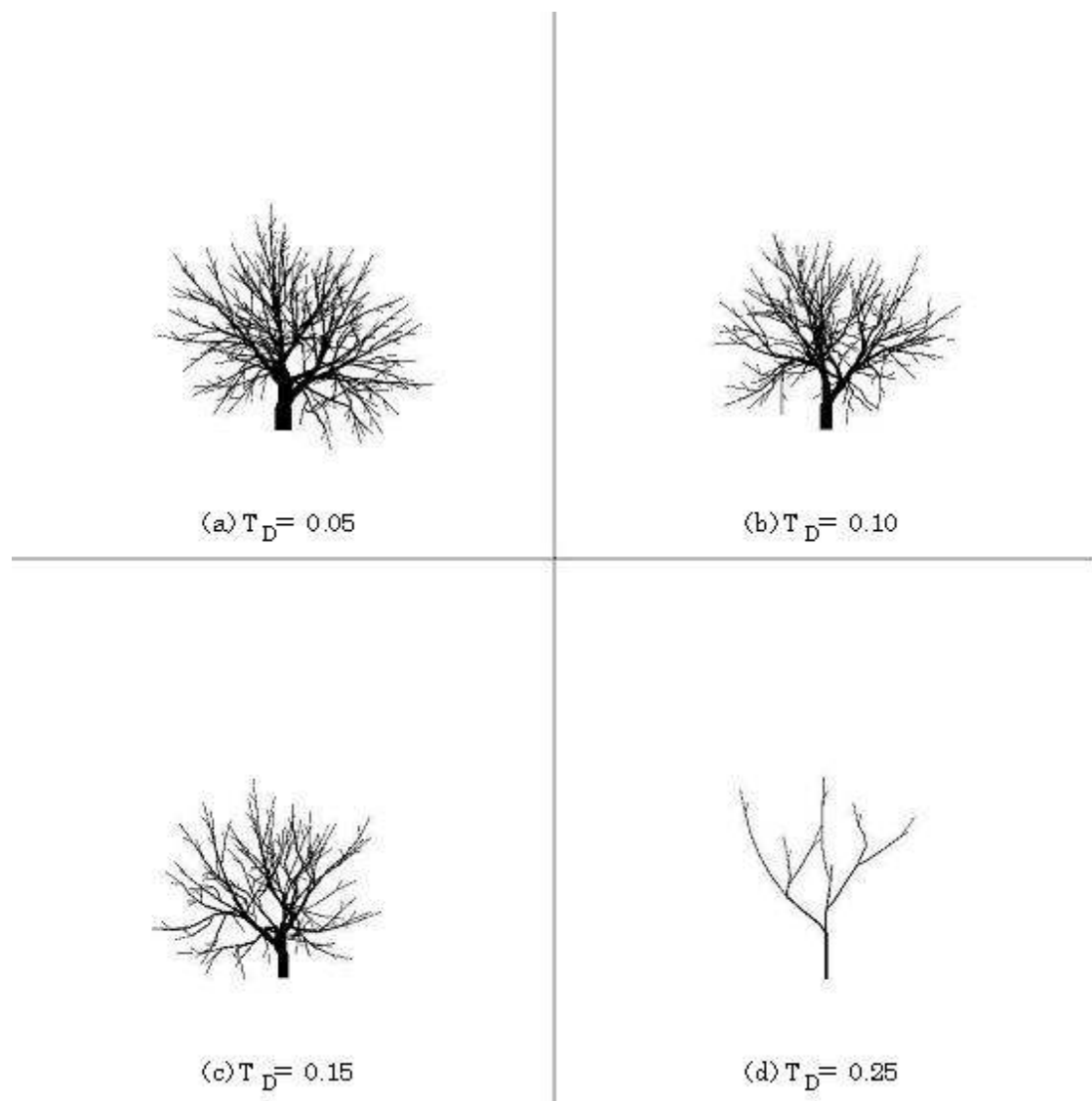


図 3.5 : 枯死閾値の違いによる樹形の変化

### 3. 2. 4 光屈性の強さによる違い

光屈性の強さの違いによる樹形の変化を図 3.6 に示す.

(a) 光屈性の影響が小さい場合, 樹形は分枝モデルに決定される規則的な分枝を繰り返した樹形となる.

(c) (d) 光屈性の影響が大きい場合, 横方向に拡がりを見せ, その後上へ向かって生長している枝がみられる.

### 3. 2. 5 光強度比による違い

光強度比の違いによる樹形の変化を図 3.7 に示す.

(a) (b) 直接光が弱いと, 横に拡がって生長する. (a) は上と横を区別していないような生長がみられる. (b) は, 上に生長する枝と横に拡がって生長する枝がはっきり分かれており, 横へ拡がる生長する枝の方が多い.

(c) (d) 直接光が強いほど, 上へ向かって生長し, 横への拡がりが小さくなる. そのため, 枝が密集になり, 淘汰しあい, 枝数が少なくなっている.

### 3. 2. 6 葉球半径による違い

葉球半径の違いによる樹形の変化を図 3.8 に示す.

(a) 葉球半径が小さい場合, 光を遮られることが少なくなり, 枝の分布が密になり, 上に向かって生長する.

(c) 葉球半径が大きい場合, 光が遮られることが多く, 枝の分布が疎になる. 枝は, 上, 横にも大きく拡がって生長する. 枝垂れもみられる.

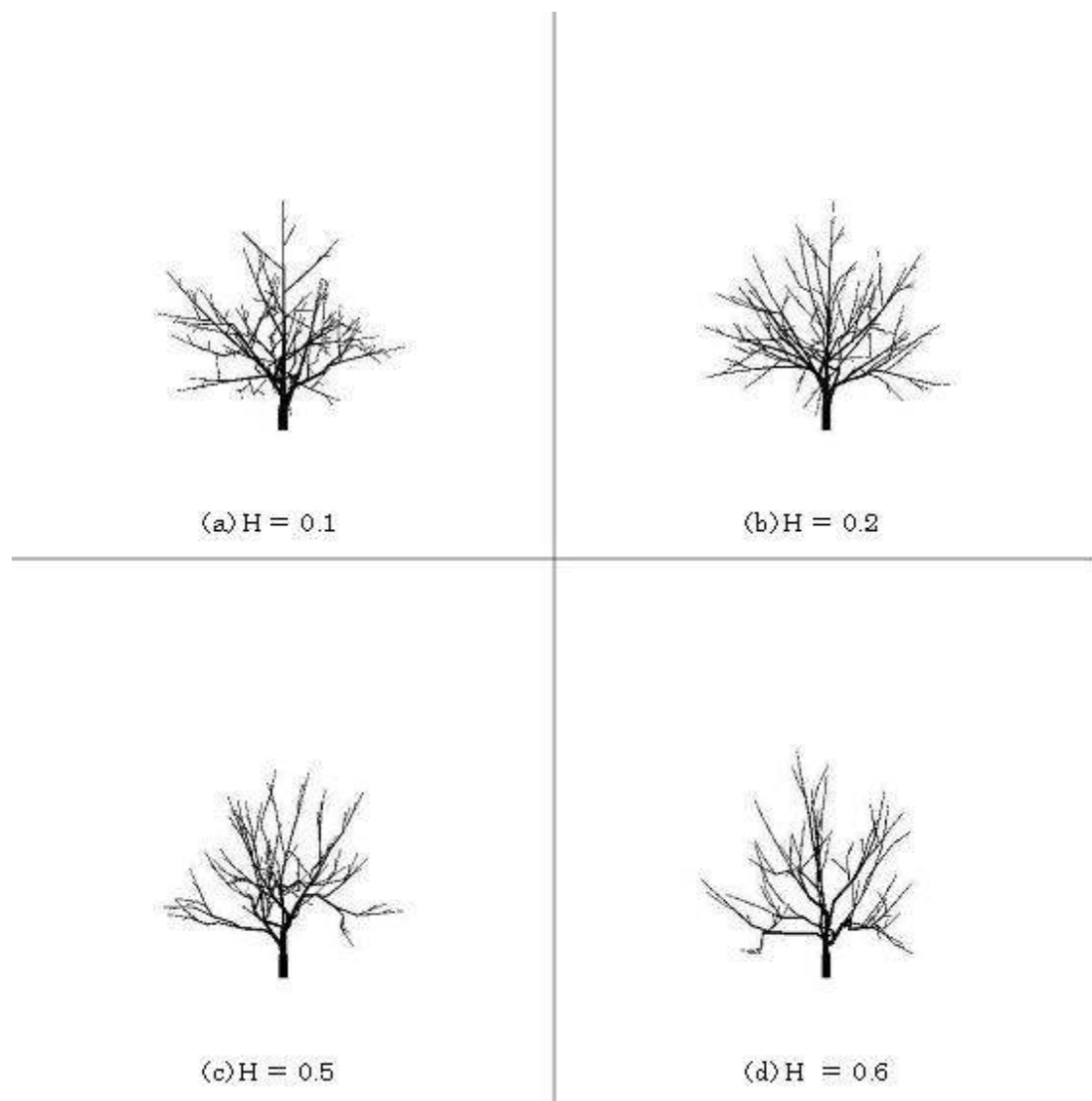


図 3.6 : 光屈性の強さによる違い

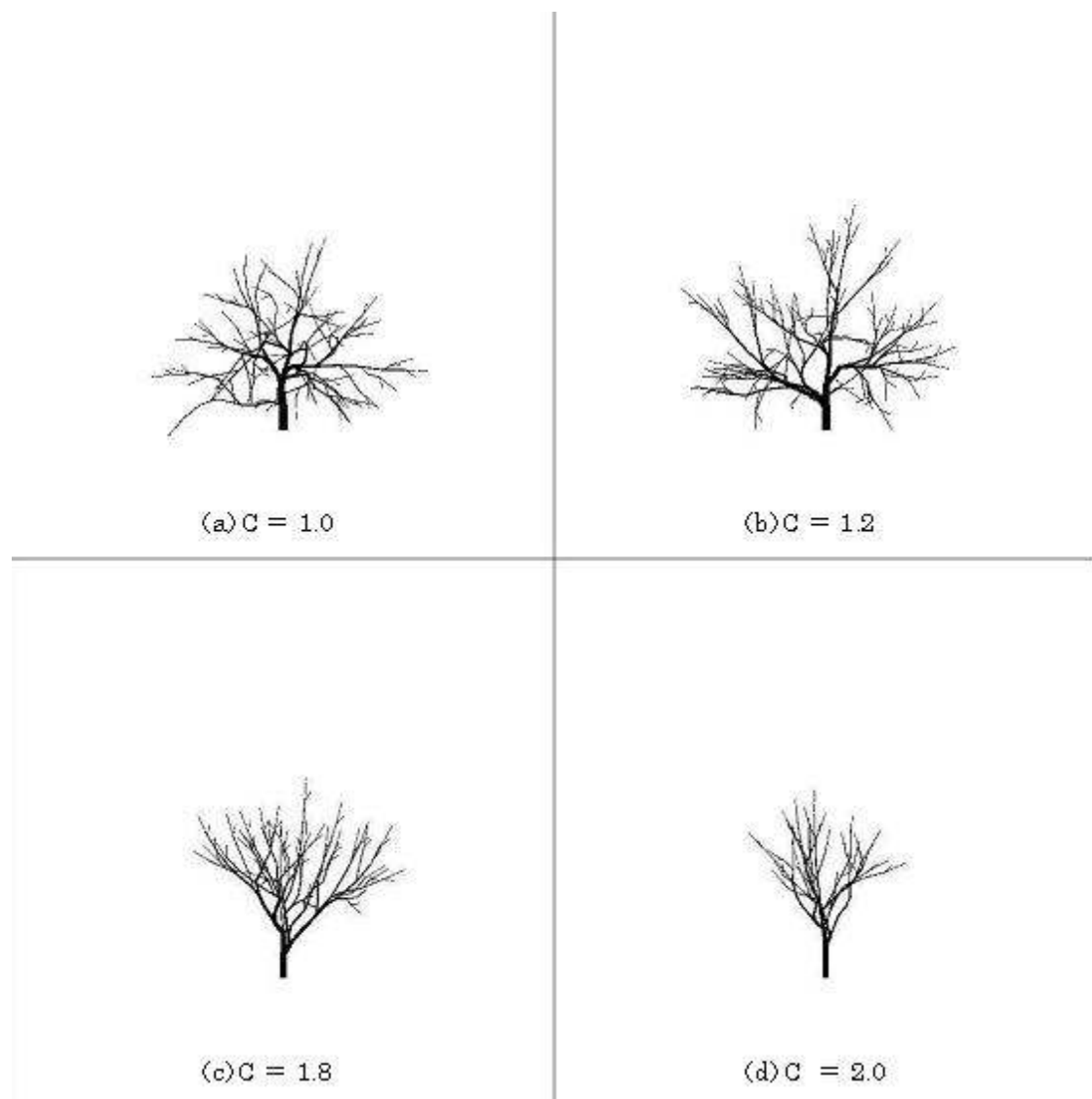


図 3.7 : 光強度比の違いによる樹形の変化



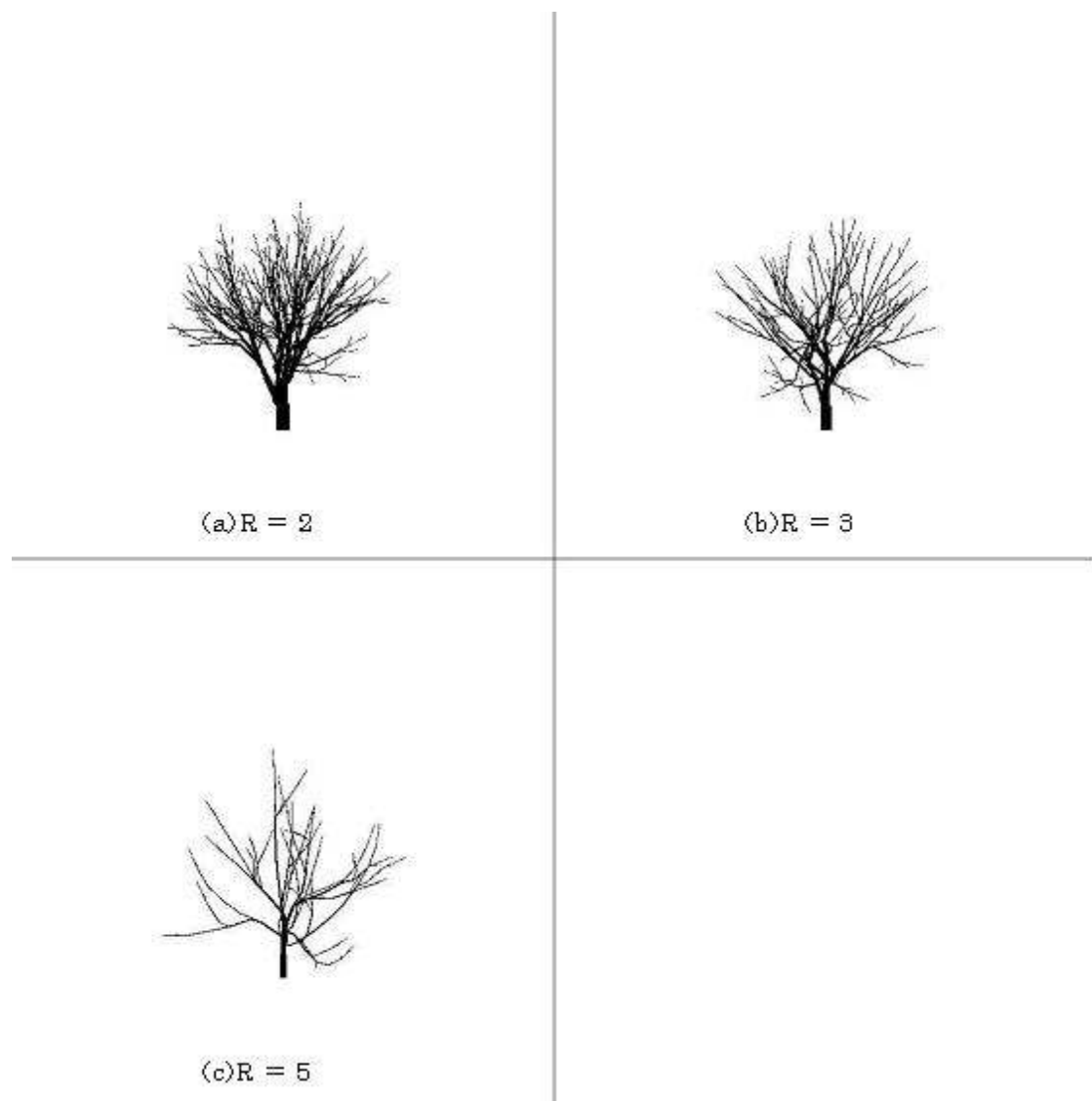


図 3.8 : 葉球半径の違いによる樹形の変化

### 3. 2. 7 避陰反応における伸張生長による違い

避陰反応における伸張生長の違いによる樹形の変化を図 3.9 に示す.

(a) 避陰反応による枝の長さの変化が小さいと、枝は横に広がる傾向がある.

(c) 枝の長さの変化が大きいと、上へ向かって生長する傾向がある. (a) と (c) では樹高の違いとともに、円錐形の樹冠と逆円錐形の樹冠の全く異なる樹冠を形成しており、他の樹木の陰に隠れたときに選択する樹形を示している.

### 3. 2. 8 避陰反応の閾値による違い

避陰反応の閾値の違いによる樹形の変化を図 3.10 に示す.

(a) 閾値が小さいと、避陰反応をほとんど示さないため、側枝の生長が大きく、枝が仮軸分枝に似た形で生長している.

(c) (d) 閾値の大きいと、枝が外に張り出すように生長しており、樹木として広がりがみられる.

### 3. 2. 9 葉序による違い

葉序の違いによる樹形の変化を図 3.11 に示す.

(a) 横方向に枝を広げることが出来ず、生長方向に偏りがみられる. これは、1/2 葉序によって主軸を挟むように、平面上に側枝がでる分枝になるためである.

(b) (c) (d) 円形上に枝を広げ生長している. 特に (d) は、枝の重なり合いが少なく、枝垂れもみせていない. また、広げた枝に多くの葉をつけ、自らの避陰反応によって伸張生長を促し、(a) との樹高の差につながっていると考えられる.

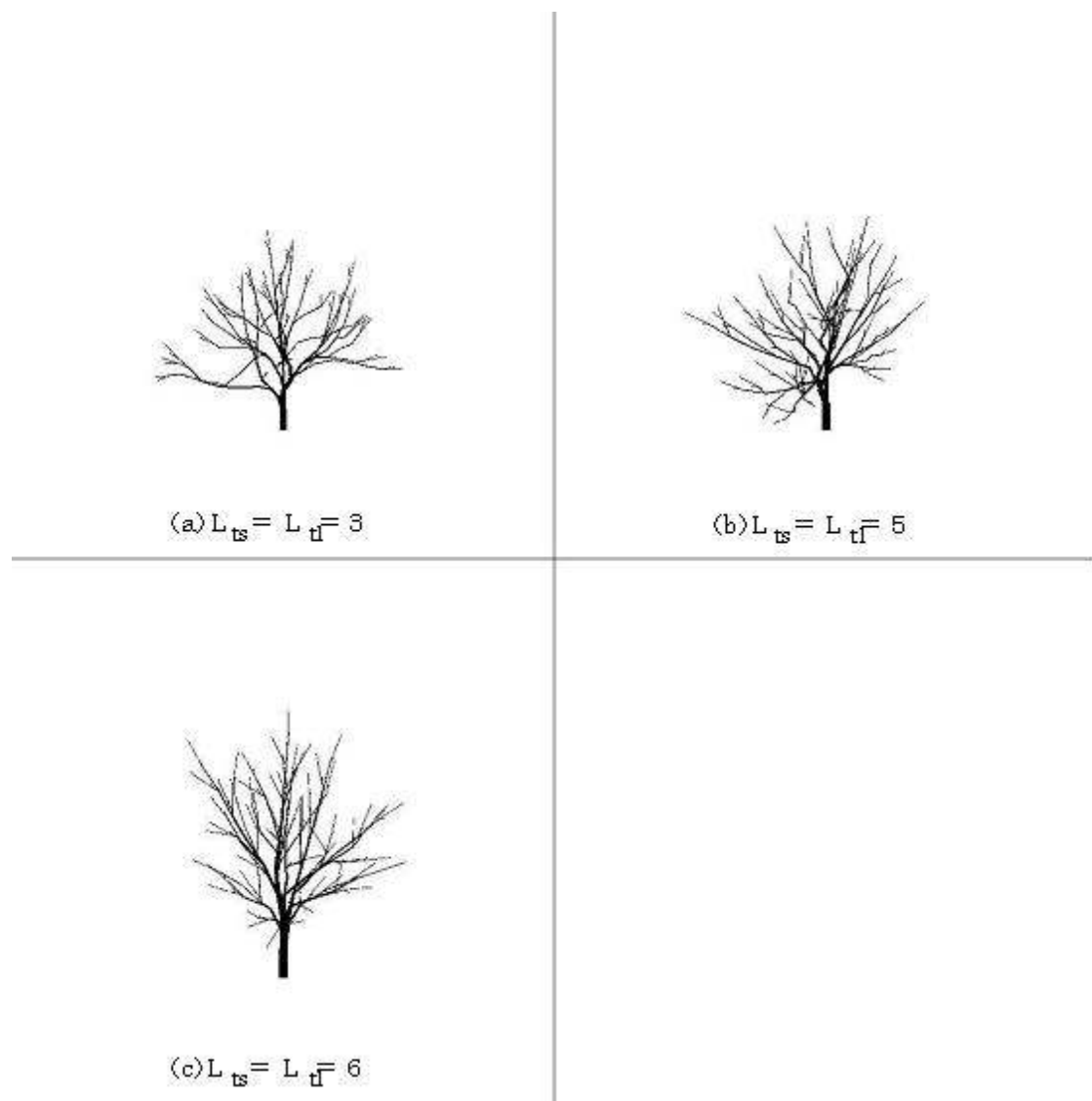


図 3.9 : 避陰反応における伸張生長の違いによる樹形の変化

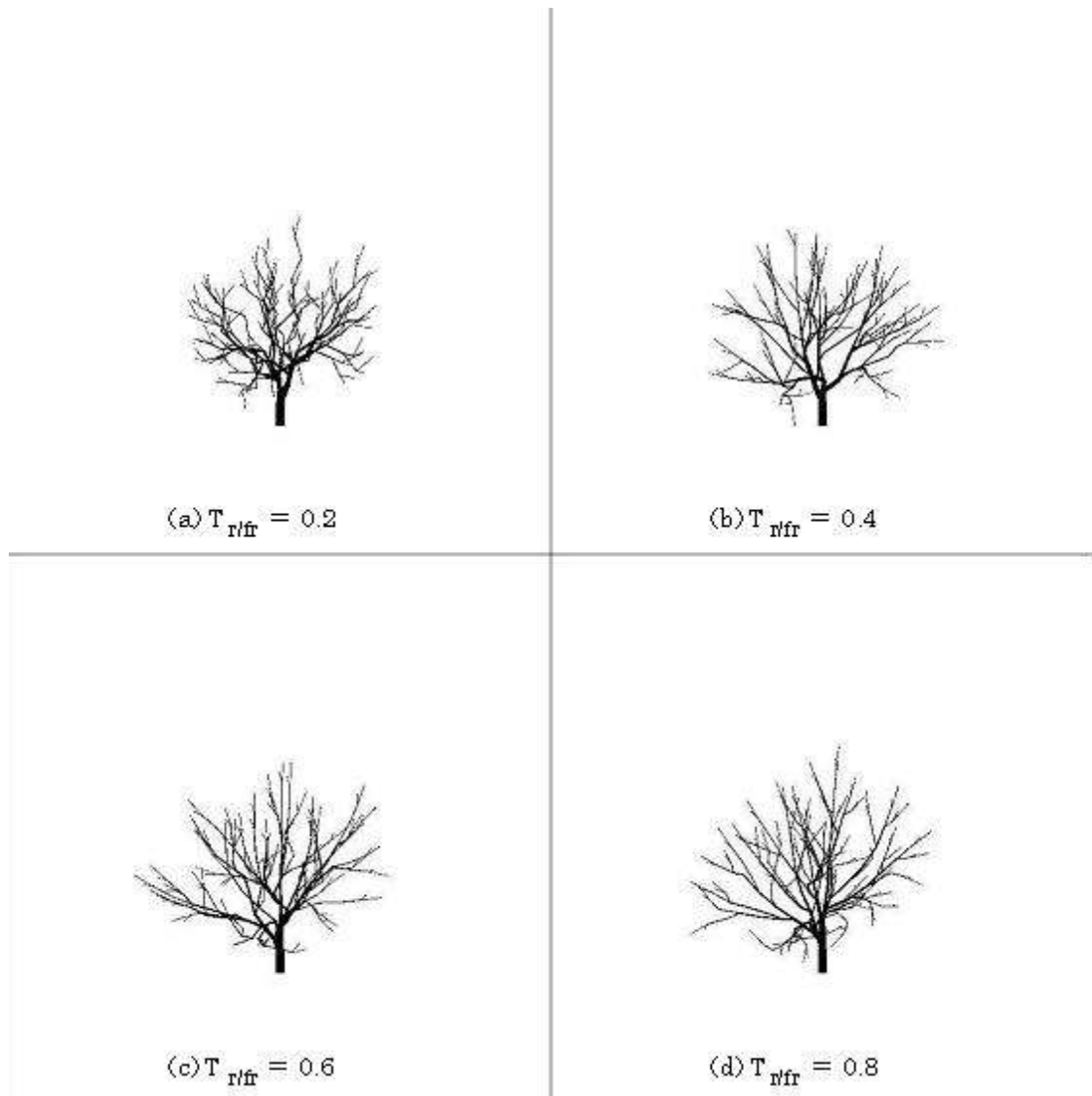


図 3.10 : 避陰反応の閾値の違いによる樹形の変化

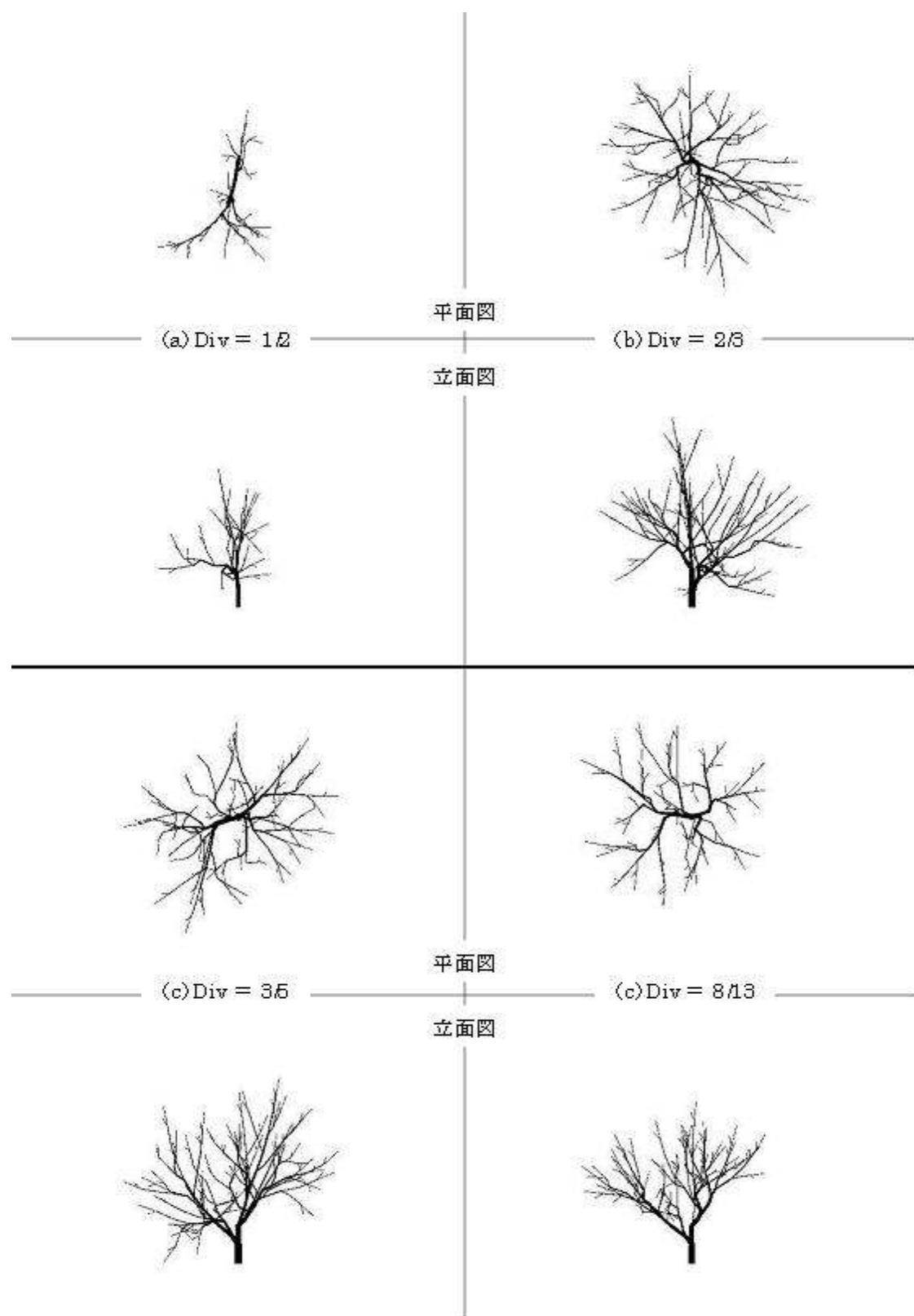


図 3.11 : 葉序の違いによる樹形の変化

### 3. 3 環境の違い

本節では，本論文で提案する周囲環境の違いで得られる樹形の変化を具体的にいくつかの例を用いて説明する．また，いくつか実際の樹木と比較を行い，環境に適応して形作られる樹形の特徴が表現できていることを確認する．

#### 3. 3. 1 2本の樹木

他の樹木と影響を及ぼしあうモデルとして，樹木間の距離が近い2本の樹木のモデルを作成する．図 3.12 では，図 3.13 の実際の樹木と酷似した樹木モデルとなっており，2本の樹木が互いに離れる方向に生長する特徴が表現できている．

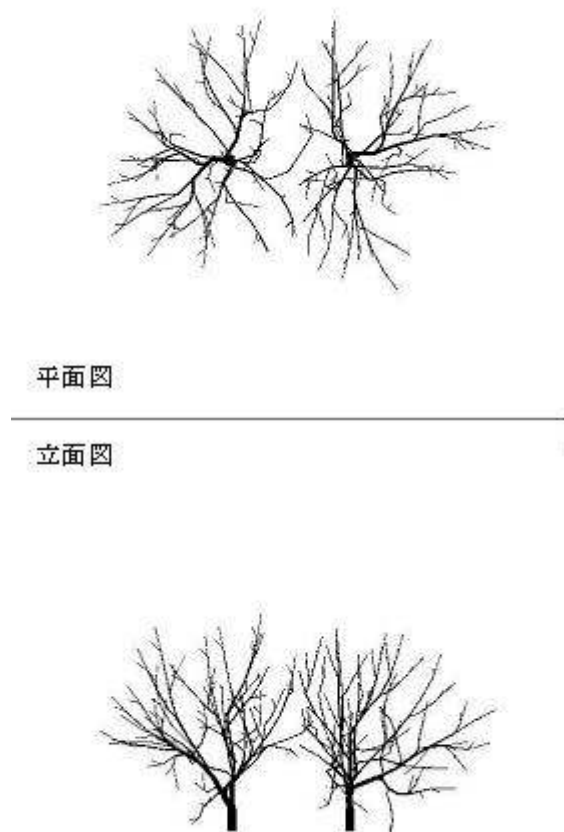


図 3.12 : 2本の樹木モデル



図 3.13 : 2 本の樹木

### 3. 3. 2 複数本の樹木

図 3.14 では、 $3 \times 3$  のグリッド上に樹木を配置することで擬似的な森林を再現し、樹木間の影響による樹形の変化をみる。

2 本の樹木のときにみられた互いに離れる方向への生長が、仮想森林モデルでも森林の外側に向かう生長の形でみられる。一方で、中央の樹木モデルは、周囲に樹木があるため、横方向に広がる生長ができず、上方向への生長がほとんどである。また、角に存在する樹木と比べて、他の樹木は枝先が高い位置にあり、わずかながら樹高も高く生長している。

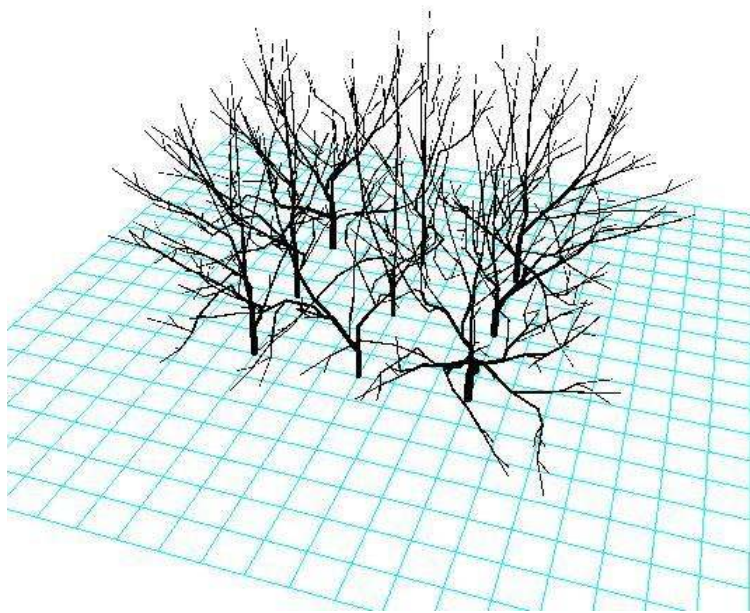


図 3.14 : 複数本の樹木による仮想森林モデル



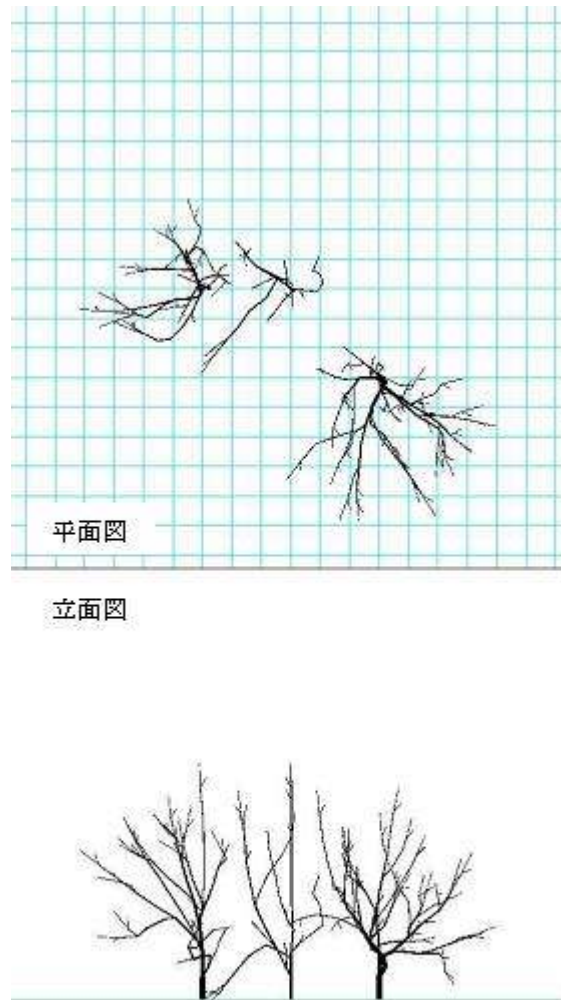


図 3.15 : 図 3.14 から抜き出した樹木モデル

### 3. 3. 3 光遮蔽物が存在する環境の樹木

環境の影響を考えたモデルとして、ビルなどの建物がすぐ横に存在する樹木モデルを作成する。図 16 では、建物脇に生長する樹木の特徴である壁から離れる方向に生長する樹形を示している。また、建物と反対側の枝垂れも表現できており、図 3.18 の実際の樹木と酷似した樹木モデルが作成できている。

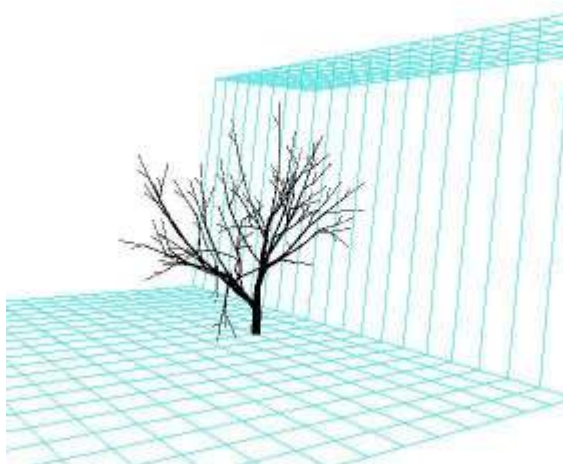


図 3.16 : 建物脇の樹木モデル



図 3.17 : 図 3.16 の側面図



図 3.18 : 建物脇の樹木

### 3. 3. 4 斜面で生長する樹木

特徴的な環境による樹木のモデルとして，斜面で生長する樹木モデルを作成する．図 3.15 は，図 3.17 の樹木と同じ斜面に沿う形の樹形を表現できている．また，斜面を下がる方向に枝垂れをしており，空間があること知るかのような生長がみられる．

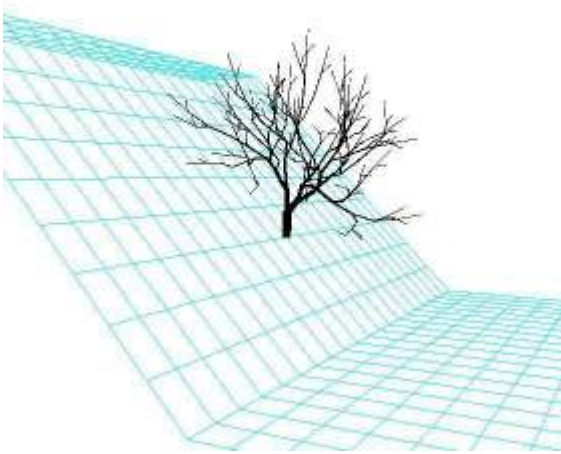


図 3.19 : 斜面で生長する樹木モデル

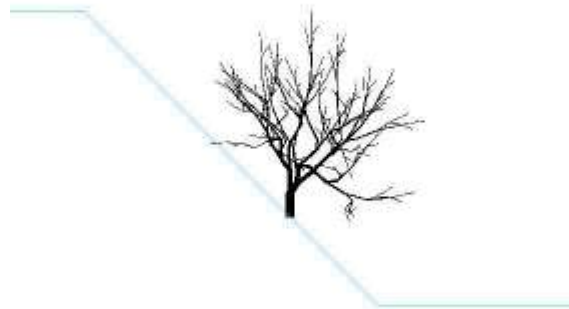


図 3.20 : 図 3.19 の側面図



図 3.21 : 斜面で生長する樹木

## 第4章 結論

本論文では、環境のモデル化を行い、光環境モデルに組み込むことで、環境に応じて樹形を変化させる自然な樹木を生成することが可能であることを示した。そして、モデルのパラメータから、樹高、枝の広がり、樹冠の形状など、樹種により異なる特徴を表現し、遺伝的な違いを表現できることを示した。すなわち、樹木の遺伝的形質と光環境の相互作用による樹形の形成を実現した。

波長によって異なる光の減衰率を考慮することで、光の量だけでなく質も樹形を変化させる要因になること、そして、よりよい光環境の獲得方法を選択的に判断する方法である避陰反応を組み込むことが可能であることを示した。この避陰反応により、他の樹木の陰に隠れたときに選択する樹形の変化を示せ、光屈性により光を追って生長するだけでなく、光を獲得しやすいように樹形を変化させる生長の表現が可能であることを示した。

そして、他の樹木から影響を受けて生長する樹木、ビルなどの建物によって光が遮られている環境で生長する樹木、斜面のように遮られてはいないが平地と異なる光環境で生長する樹木を、実際の樹木と比較し環境に応じて生長する樹形の特徴を表現可能であることを示した。以上のことから、本手法の周囲環境のモデル化は、景観を再現する場合において、様々な環境で生長する樹木モデルの生成に有効であることを示した。

本論文では、実際の樹木との比較を行うため、樹形の特徴がはっきりと表れる比較的単純な環境モデルのみを作成した。周囲環境を作成する四角形メッシュを細かい分割で行うこと、格子に色の違いによる反射光の強さなどを考えることで、複雑な環境にも応用は可能である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、御指導賜りました横澤肇教授に心より感謝致します。  
また、多くの御指導、御助言を頂きました於保俊様、井上智仁様にも深く感謝致します。  
最後に、お世話になった情報科学研究科、環境学研究科の皆様に感謝致します。

## 参考文献

1. Masaki Aono and Toshiyasu L. Kunii: “Botanical Tree Image Generation”, IEEE Computer Graphics and Applications, pp.10-34 (May 1984)
2. 金丸直義, 千葉則茂, 高橋清明, 斎藤伸自: “向日性による樹木の自然な枝振りのCG シミュレーション”, 電気情報通信学会論文誌 D-II Vol.J75-D-II No. 1 pp.76-85 (1992-1)
3. 千葉則茂, 大川俊一, 村岡一信, 三浦守: “CG のための樹木の生長モデル—架空の「植物ホルモン」による自然な樹形の生成—”, 電気情報通信学会論文誌 D-II Vol.J76-D-II No. 8 pp.1722-1734 (1993-8)
4. 金山知俊, 阪田省二郎, 増山繁: “分枝規則を再現し, 光, ホルモンの影響を考慮した樹木の生長モデル”, 電気情報通信学会論文誌 D-II Vol.J79-D-II No. 8 pp.1362-1273 (1996-8)
5. Wilhelm Troll: “Praktische Einführung in die PFLANZENMORPHOLOGIE”, Gustav Fischer Verlag (1954). 中村信一, 戸部博訳 “トロール図説植物形態学ハンドブック”, 朝倉書店 (2004-6)
6. 和田正三, 徳富哲, 長谷あきら, 長谷部光泰: “植物の光センシング—光情報の受容とシグナル伝達—”, 秀潤社 (2001-10)
7. 甲山隆司ほか: “植物生態学”, 朝倉書店 (2004-12)
8. 村岡裕由ほか: “光と水と植物のかたち”, 文一総合出版 (2003-3)
9. 高倉直: “植物の生長と環境—新しい視点と環境調節の課題—”, 農山漁村文化協会 (2003-7)
10. 本田久夫: “生物の形づくりの数理と物理”, 共立出版 (2000-4)
11. J. Edeiman and M. Black: “PLANT GROWTH”, Heinemann Educational Books (1970). 八巻敏雄, 八巻良和訳 “植物の生長”, 河出書房新社 (1974-2)
12. W. Galston: “THE LIFE OF THE GREEN PLANT”, Prentice Hall (1961). 村上悟訳 “緑色植物の生理”, 岩波書店 (1962-7)
13. 西田隆頼: “向日性を考慮した樹木の三次元枝構造モデル作成”, 名古屋大学大学院人間情報学研究科 修士論文 (2004)