

森林の景観施業に関する基礎的研究

— コンピュータグラフィックスによる樹形生成モデル —

鈴木悌司*

Fundamental studies on forests landscape management

— A representation method for tree shapes

using computer graphics —

Teiji SUZUKI*

抄 録

本研究は、コンピュータグラフィックス技術を用いて樹木の成長や森林景観をリアルにしかも経時的、立体的に画像化するシステムを開発し、森林の景観施業および緑化計画の立案における視覚的評価にもとづく新しい計画手法に発展させることを考究した。針葉樹の樹形生成モデルについては、トドマツを事例にこれまでの報告例や実測値を補完データとして、樹形を支配する枝の数と角度、樹高および直径成長、枝寿命等の形状要素を時間（樹齢）の関数として樹形生成モデルを考察した。各種のパラメータを時間（樹齢）により変化させることにより、樹齢増加に伴う形状変化をはじめ、多様な樹形が表現できることを示した。

また、広葉樹の樹形表現としてはホオノキを対象樹種として、成長部位における光環境のシミュレーションモデルを考察し、受光量に応じた枝の伸長と枯死および直径成長など、光条件に対応した樹形生成のためのモデリングと単木形状の3次元表示を試みた。その結果、自然な枝振りをもつ広葉樹の樹形表示が可能なことを示した。

一定の広がりをもつ森林景観表示として、多様な個体の生成とそれらを集合表示させた人工林の景観表示、針広混交比率を変えた天然林の表示、さらに季節変化などの森林景観のシミュレーションが可能であることを示した。また、街路および建造物への樹木の配置による植栽景観のシミュレーションを試み、いずれも自然的な画像が表現可能なことを示した。

数値情報に加えコンピュータグラフィックス技術を用いることにより、樹種や成長にともなう景観変化等が画像上で時間的・空間的に予測することができ、視覚情報を必要とする森林の景観施業や緑化計画の立案や開発の手段を見いだすための大きな手がかりを得ることができた。

Abstract

The purpose of this paper is to develop growth models for tree shape indication using computer graphics, and develop tree planting plans and forest landscape planning on the basis of visual evaluation.

*北海道立林業試験場 Hokkaido Forest Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-01

[北海道林業試験場研究報告 第33号 平成8年3月, Bulletin of Hokkaido Forestry Research Institute, No. 33. March, 1996

We made a growth model that considered the branch number which ruled over tree shape on the bases of reported examples and field data. And our sample included Todo-fir (*Abies sachalinensis*) a conifer. Using branch angle and diameter growth as a function of time, we showed that we could express various tree shapes as an image by letting a parameter of every kind change. We also developed a growth model that considered light intensity using a basic Silver magnolia (*Magnolia obovata*): a broadleaf tree. This growth model of the broadleaf tree correspond with light condition, branch death, and diameter growth. We showed that a tree shape indication which had a natural shape was possible.

Considering both growth models expressed real tree shape well. The computer image could be formed which had a natural branch pattern, using this model.

目 次

緒 言	4
1 研究の背景と目的	4
2 研究小史	4
3 研究の方法	5
第1章 針葉樹型の樹形生成モデル	6
1 はじめに	6
2 研究方法と材料	6
3 樹形生成のための形状定義と成長モデル	7
1) 単木の形状定義	7
2) 樹高成長モデル	8
3) 1次枝の形状と成長モデル	9
(1) 輪生枝の発生数	9
(2) 発生角度	9
(3) 樹冠角度	9
(4) 初期伸長量	9
(5) 第2枝階以降の伸長量	9
(6) 成長停止年齢	10
(7) 着枝角度の変化	10
(8) 枯れ枝の着枝年数	10
4) 2次枝以下の各分枝階の形状と成長モデル	11
(1) 分枝角度	11
(2) 伸長量と発生率	11
(3) 成長停止年数と枯れ枝の着枝年数	12
5) 直径成長のシミュレーションモデル	12
4 単木形状の画像生成	12

1) 成長シミュレーション表示の手順	12
2) 樹冠形状の生成と評価	13
3) 樹冠疎密度の表現手法	14
4) 針葉樹の樹種表現	15
5) 単木形状の成長シミュレーション表示	15
第2章 広葉樹型の樹形生成モデル	17
1 はじめに	17
2 研究方法と材料	17
3 単木形状の生成モデル	18
1) 分枝モデル	18
2) 分枝の発生数と発生角度	19
3) 個葉形態と配置	19
4 受光量を考慮した成長モデルの開発	21
1) 受光量のシミュレーションモデル	21
2) 屈光性および光探索性	21
3) 受光量に対応した伸長量	22
4) 直径成長のシミュレーションモデル	23
5) 枝の枯上がりと消失モデル	24
5 単木形状の画像生成	25
1) 成長シミュレーション表示の手順	25
2) 生成樹形とその評価	26
3) 単木の成長シミュレーション	27
4) 競合成長シミュレーション	29
第3章 景観施業への展開	30
1 はじめに	30
2 森林景観の生成手法	30
1) 人工林の景観表示	30
2) 天然林の景観表示	32
3 施業計画の可視化	35
1) 間伐指針のシミュレーション	35
2) 施業体系の景観シミュレーション	36
4 緑景観計画への応用	36
1) 植栽景観のシミュレーション	37
2) 自然環境における建築景観シミュレーション	39
摘 要	39
文 献	41

緒 言

1 研究の背景と目的

コンピュータグラフィックスは、コンピュータを用いて図形や画像を生成する技術一般を意味する。基本的な技法としては、図形を数値データに変換してコンピュータに入力し、そのデータの一部を変換することにより物体の移動や視点位置の移動等原図を自由に変形させ、目的とする図形を描き出そうとするものである。コンピュータグラフィックスは、一度データを作成、入力することにより自由な視点からの表示とリアルタイムの画像生成が可能なことから機械設計、建築や都市計画におけるCAD (computer added design) システム、TV等のコマーシャルフィルムやアニメーションの製作等さまざまな分野で広く実用化されている。また、これまでのパース図や模型によるプレゼンテーションが内容の私意的誇張や臨場感に乏しい欠点があるのに比べ、コンピュータグラフィックスは、データに従った忠実な画像を生成できることから視覚的プレゼンテーション手法として有力な方法のひとつとされている。一方、近年、森林の施業計画において木材生産と環境保全が調和した施業技術の確立が求められており(和 1986)、特に景観に配慮した施業計画を立案する上で、数値情報の可視化と視覚的評価に基づく施業計画の重要性が増しているところである。とくに、コンピュータグラフィックスは視点位置や視点距離等3次元の視覚評価や経時的表現が必要とされる森林の景観施業、さらに樹木が重要な構成要素である自然景観や公園、街路の植栽計画等の緑化計画を立案する上でも有効な手段となろう。すなわち、これまで林分構造や樹木の情報は、立木位置、樹高、枝下高、胸高直径、樹冠直径等の数値情報によって示されていたが、コンピュータグラフィックス技術を用いることにより樹種や成長にともなう景観変化等が画像上で予測することができる。さらに、施業体系図や密度管理図と併用することにより新しい景観計画の策定手法として発展させることが可能と思われる。そこで、本研究はコンピュータグラフィックスを用いて樹木の成長や森林景観をリアルにしかも時間的・空間的に画像上で表現するシステムを開発し、視覚的評価に基づく新しい景観施業や緑環境計画へ発展させることを目的とするものである。

2 研究小史

これまで、森林構造の視覚的な把握方法としては樹冠投影図やベルトトランセクトによる側面図等、2次元の表示手法が一般的であった。これら2次元の表示手法は、個別の立木の樹冠部の位置関係を立体的に認識できないため、森林構造のシミュレーションに応用することが難しいとされてきた。森林構造を3次元的に解析した例は田中(1944)が針広混交林の樹冠部を解析した例がある。これはコードラート調査後の森林を皆伐し、全立木を樹幹解析し、このデータをもとに樹冠部のミニチュアを作成し、縮尺に合わせた位置に配置して写真撮影し、森林構造を観察するものであった。この方法の長所は森林の動態を把握できる点にあるが、対象となる森林が残らないこと、調査、解析に多大の労力を要する点が短所とされている(野堀 1990)。一定の広がりをもつ地域の森林構造をコンピュータグラフィックスを用いて3次元的に表示した例は少ない。Kojimaら(1972)、塩田・小島(1982)、塩田(1983)は森林景観における植生改変状況を表示する手法として、針葉樹、広葉樹等についてシンボル化したデータをあらかじめ作成準備しておき、実際の大きさと視点からの距離をもとに透視画面上での大きさを計算して描画する方法により、森林の現況および伐採状況について景観シミュレーション表示を行った。菱沼(1986)は、地形データをワイヤフレームにより3次元表示を行い、立体林相図を用いての地形解析や植生分布の解析手法を報告している。野堀(1990)は、基本的な森林構造を現地で実測し、伐採前後における森林構造の変化の3次元グラフィックスとその解析例を示し、コンピュータグラフィックスによる景観計画手法を報告している。しかしながら、これらにおける表示樹形はいずれも樹冠部をシンボ

ル化したものであり、樹冠の枝葉部まで表示されていないことから、遠景域のシミュレーション画像においては有効であるが、単木形状の表現を必要とする森林景観のシミュレーション画像としては十分なものはいえない。特に近景における景観シミュレーションにおいては樹種が特定できるレベルの樹形画像が必要となる（本條ほか 1992）。

コンピュータグラフィックスによる樹木の単木形状の3次元表示画像生成に関し、これまで多くのモデルが提案されている。Mandelbrot (1977) や Oppenheimer (1986) は、樹木の枝分かれにおける自己相似形に着目し、フラクタル理論を用いての樹形モデルを提案した。しかし、単純なアルゴリズムで、容易に樹木らしい形状生成を得ることができるが、実存の樹種の正確なモデル化は難しい。Lindenmayer (1968) や Aono・Kunii (1984) は、LシステムやAシステムと称する分枝モデルを提唱し、分枝パターンのモデル化を試みているが、実際の植物をモデル化するにはその定義づけが複雑になる。出原 (1974)、本多 (1978 a, 1981)、Smith (1984)、石井ら (1986) は、分枝パターンの関数モデル化による樹形生成モデルを提唱し、Prusinkiewiczら (1988)、de Reffye (1988, 1990)、鈴木・大崎 (1991)、鈴木ら (1992 a)、大崎ら (1991, 1992) は種の特長としての遺伝的に定まる分枝や成長パターンを統計的に解析しモデル化する手法を提示した。これらのモデルの基本は、分枝角度や枝長や直径、あるいは枝の回転角度等のパラメータを変えることによってさまざまな樹種を表現する手法である。しかし、これらのモデルにより得られる樹形は、いずれも親枝からの分枝角度と枝の長さ等により決められることから、全体の樹形が単調な傾向にあること、さらに受光量のシミュレーション等がモデルに考慮されていないことから、隣接木の影響等競合成長のシミュレーションは行えない。自然な印象をもつ樹形を表現する手法として、成長過程での獲得形状のシミュレーション、すなわち成長シミュレーションのモデル化が重要であるとの立場から受光量不足による枝の枯死を考慮し、自然な枝密度を表現するための成長モデルが奥村・小川 (1986)、中島ら (1988)、安居院ら (1991) により報告されている。さらに、金丸ら (1987, 1991)、千葉 (1990)、Chibaら (1993) はさまざまな樹種に共通する樹木らしき感じさせる樹形生成モデルとして、向日性や植物ホルモンを想定しての成長モデルを提唱した。このモデルは受光量や枝の回避等がモデル化されていることから成長過程の形状変化が追えるモデルであり、より自然的な枝振りをもつ樹形生成が可能となった。しかし、いずれのモデルも景観シミュレーションとして要求される近景で樹種が特定され、しかも樹木の形状が経年的に追える生成モデルとしては十分とはいえない。また、従来の景観シミュレーションにおける樹木は、ある時点での樹形表現が主であったが、景観シミュレーションは経年的な変化に対応した表現が非常に重要である。そこで、本研究は、景観シミュレーション技術における基本的な課題である自然的かつ写実的な樹形生成と森林景観のシミュレーション表示を目的に樹形生成モデルの開発をすすめた。

3 研究の方法

樹形生成のための成長モデルを開発するにあたり次の方法により研究をすすめた。幾何学的な樹冠形状を示す針葉樹と楕円形状の樹冠を持つ広葉樹では成長特性や形状が大きく異なることから、同次的にモデル開発を行うよりそれぞれの樹種特性に応じたモデル開発が効率的であると考え、本研究においては針葉樹に関しては形状データや成長モデルの豊富なトドマツを対象樹種とし、広葉樹については着葉数や枝数が少ないホオノキをそれぞれ対象樹種に、次の事項を考慮しつつ研究を進めた。針葉樹の樹形生成のための成長モデルとしては、針葉樹特有の枝の枯上がりや残枝等の樹冠形状と樹齢にともなう樹形の変化に関し、これまでの報告例や実測データを基に、樹高および直径成長、枝の数と角度等についての形状要素を時間（樹齢）の関数としてとらえ、樹形の成長モデルを考察した。また、多様な広葉樹型の樹形を生成するためには遺伝的な分枝パターンによる成長モデルに加え、成長過程での獲得形

状のシミュレーションが重要と考え、受光量のシミュレーションモデル、受光量に対応した成長モデル、受光量の不足による枝の枯損と消失、枝の探索性等を考慮した成長モデルについて検討した。特に、本研究においては、近景においても樹種表現が可能な樹形生成モデルが重要であることから、これまでの報告例や実測データをもとにしたモデルの原型を作成し、シミュレーションで得られた樹形に対し視覚的な評価をもとにモデルの改良を行う方法により研究をすすめた。

本研究を取りまとめるに当たり、終始懇切な御指導を賜った北海道大学農学部教授和孝雄博士をはじめ、論文の御校閲を賜った北海道大学農学部教授五十嵐恒夫博士、同教授浅川昭一郎博士に対して深甚な感謝を申し上げます。本研究の進行に際し平素から御指導御鞭撻を下された東京農業大学生物生産学部教授畠山末吉博士、新潟大学農学部助教授阿部信行博士に謹んで感謝の意を表します。また、本研究を進めるに際し、有益な御指導と御討論を頂いた岩手大学工学部教授千葉則茂博士、北海道立工業試験場山本寧科長、同大崎恵一研究職員には有益なご指導とご討論を頂いた。また本研究の遂行にあたり北海道立林業試験場主任研究員水井憲雄博士、佐藤孝弘研究主任ならびに関係職員の皆様には多大なご協力をいただいた。あわせて心から感謝申し上げます。

なお、本論文は「北海道大学学位審査論文」である。

第1章 針葉樹型の樹形生成モデル

1 はじめに

樹木の成長過程を経時的に図化する手法としては、従来から年輪が明瞭な針葉樹を対象に、樹高と幹の成長過程を年輪をもとに解析し、断面図として図示する樹幹解析法がある。しかし、これは樹形生成に必要な3次元の数値情報や枝葉部の形状データを有しないことから樹形を立体的に表現することはできない。樹木の成長過程を3次元的に表示した例としては菱沼(1992 a)、菱沼ほか(1992 b)の報告がある。これはトドマツの樹幹部の成長過程を樹幹形と年輪構成との関係から3次元表示したものである。樹幹形状の生成過程の3次元表示例としてこれまでにない有効な手法であるが、樹冠枝葉部の形状についてはモデル化されていない。一方、コンピュータグラフィックスによる針葉樹の3次元画像生成に関しては、これまでde Reffye(1988)や金丸ほか(1988)の報告例があるが、これらは針葉樹特有の樹齢にともなう枝の枯れ上がりや枝垂れ具合等の表示が十分ではなく、リアルに樹形表現できる成長モデルはほとんど見られない。そこで、本研究では北海道の代表的な針葉樹であるトドマツを対象樹種として、これまでの報告例や実測値をもとに景観シミュレーションのための樹形生成モデルを開発し、単木形状の3次元表示を行った。

2 研究方法と材料

針葉樹は、広葉樹と比較して幹と枝の区別が明瞭であること、樹冠は円錐形を呈し、幹および枝に枯枝の残存が目だつ等の外観的な特徴を有する。これらの形状は幹および枝の成長様式、葉序に規定される枝の出方や分枝パターン、さらには枝の疎密、枝や幹の太さ等種に特有の遺伝的形態に加え、個々の樹木の成長過程において形成される後天的な形状等から形成されたものといえる。したがって、コンピュータグラフィックスにより自然的な樹木の形状を表現するためには、樹形の基本となるこうした幹や枝等の骨格形状の定義と、幹や枝の発生様式、さらに樹高、直径、樹冠成長等時間(樹齢)にともなう樹冠形状の変化等の表現が可能な数式モデルを構築する必要がある。特に、針葉樹の樹形生成モデルにおいては、針葉樹特有の樹冠形状と樹齢にともなう樹形表示が可能な成長モデルが必要である。そこで、針葉樹の樹形生成モデルの作成にあたり次の事項について考慮しながらモデルの検討をすすめた。

- (1) リアルな樹形表示のための幹や枝等の形状解析

- (2) 樹冠形状を支配する幹や枝等の形状要素とパラメータの探索
- (3) 樹冠枝部の疎密感等樹勢の表現
- (4) 針葉樹特有の枝の枯上がりや残枝の表現
- (5) 樹齢にともなう形状変化の表現

こうした樹形生成のための成長モデルとパラメータについては、道有林岩見沢経営区76林班にあるトドマツ41年生林分内から得られた優勢木、平均木、劣勢木の伐倒供試木3本を対象に1次枝、および2次枝以下の諸形状の測定結果をもとに推定した。幹

および枝の形状解析として、発生に関しては発生位置と発生割合・発生方向、成長に関しては伸長量と直径成長量、形状変化については枝垂れや枯上がり、枝の消失等である。供試木一覧表を表-1に示した。

表-1 トドマツ樹幹解析木一覧表

資料	優占度	樹高	胸高直径	枝下高	樹冠直径
No.1	優勢木	21.7m	36.0cm	6.0m	8.0cm
No.2	標準木	18.1	21.1	8.8	5.2
No.3	劣勢木	14.4	13.0	9.7	3.3

3 樹形生成のための形状定義と成長モデル

コンピュータグラフィックスによる樹木を中心とした景観シミュレーションでは立体感のある樹木の表示が要求される。コンピュータグラフィックスによる樹形表示手法としては、手続的形状定義法により樹形を生成する方法が有効である(金丸ほか 1988)。この方法は、枝の発生する位置と数および方向等の骨格形状をあらかじめ3次元的に定義し、その伸長量と直径成長量、枝垂れや枝の枯上がり等を計算で求めてゆく方法である。またこの方法は視点位置を自由に設定できる利点があり、さらに形状生成の過程に時間的要素を組み込むことにより経時的な形状変化、つまり樹木の成長過程のシミュレーション表示が可能である。枝や幹の長さや太さ、枝垂れ、枯れ枝の残存等は樹木が成長していく過程で形成される成長の履歴であり、こうした定義方法により成長過程のシミュレーションが可能となる。

1) 単木の形状定義

そこで、本論文では手続的形状定義法による樹形生成(以下成長モデルとする)を前提に、トドマツ単木の形状定義を検討した。トドマツの樹形を模式的にみると、図-1に示すように幹(主軸)と幹から発生する輪生状の枝(輪生枝)から構成される。幹は単軸分枝型の成長様式を示し、枝は幹の成長とあわせて成長し、同時に側方へ枝を発生させる。当年に発生した輪生枝を第1枝階、その時の枝を1年生枝(当年生枝)、前年に発生した輪生枝を2年生枝、以下、順次樹齢に対応した枝階と枝齢が定義づけられる。さらに、枝は図-1に示すように幹から発生する1次枝、1次枝から発生する2次枝、以下3次枝、4次枝等の分枝階から構成される。全体の単木形状は、基本的にはこうした幹と枝の成長と分枝の繰り返しおよび樹齢や枝齢の増加にともなう枝の枯れ上がりや残枝により、針葉樹特有の樹冠形状が形成されていく。

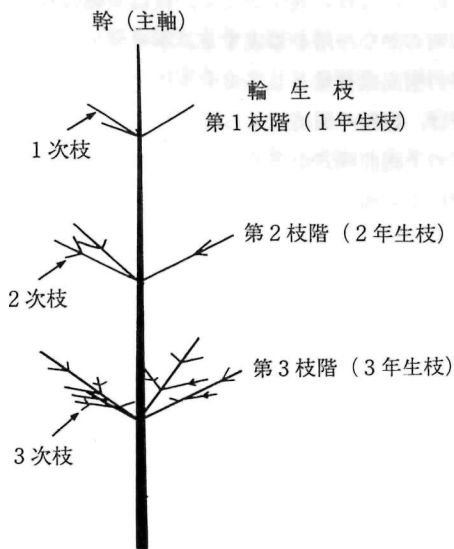


図-1 樹幹形状の模式図

こうした単木形状を表現するために、樹形を支配する幹の成長および枝の発生と消長、さらには樹齢

表-2 トドマツの形状と成長に関するパラメータ

	形状要素	パラメータ
幹	樹高成長 幹の直径	地位指数、樹齢 樹高、地上高、産地、樹冠級
	1 発生数 分枝角度	産地、輪生枝係数 樹齢、発生年次、初期分枝角度、 最終分枝角度、個体の寿命、枝齢、 年枝垂れ角
次 枝	発生方向 伸長量	発生数、枝序、発生年次、変動範囲 樹冠角度、初期分枝角度、枝齢、伸長量係数、 樹齢、初期樹冠角度、樹冠角度係数
	直径 反重力性	枝先からの長さ、相対成長係数 枝齢、上方向への変動量
2 次 枝 以 下	発生数 分枝角度	親枝の伸長量 遺伝成分、枝齢
	伸長量 直径 枝の乱雑さ 最小親枝長	親枝の伸長量、相対成長係数 枝先からの長さ、相対成長係数 2次枝の変動量 成長可能な親枝の最小長さ
形状 変化	成長停止年数 枝の寿命 枯れ枝消失率 1次枝の消失	1次枝の寿命 上位の枝の成長停止年数、活性度 成長停止後の経過年数、着枝年数 成長停止後の経過数

増加にともなう樹冠の形状変化の表現が可能な成長モデルを検討した。すなわち、枝の発生に関しては発生位置と発生割合・発生方向、成長に関しては伸長量と直径成長量、形状変化については枝垂れや枝の枯上がり、枝の消失等である。なお成長モデルは、まず樹形に関与すると考えられる形状因子を、これまでの報告例や表-1に示した供試木の実測データをもとに推定してモデルの原形変化を作成した。次いで、シミュレーションで得られた樹形に対して視覚的な評価をもとにモデルの改良を行うとともに、さまざまな形状因子の組み合わせから樹形生成のためのパラメータを抽出し、モデル化を行った。これらのパラメータを形状要素別にまとめ表-2に示した。樹形生成のための成長モデルは次のように決めた。

2) 樹高成長モデル

コンピュータグラフィックスにより樹木の樹高成長シミュレーションを行うためには、生育条件や樹齢に対応した主軸の伸長量をあらかじめ時間（樹齢）の関数としてとらえ定義する必要がある。トドマツ、エゾマツ等の

針葉樹においては、春に梢端部から新梢（主軸）を伸ばし、春から夏にかけての短期間に伸長を停止させ、その年の樹高成長を終了する。また、伸長した主軸上には枝の発生がなく、枝は主軸の基部にまわって輪生状に発生するため、図-1に示したように明らかな枝階を形成する。本モデルにおいては1年間の主軸の伸長量を時間の関数（樹齢）とし、連年の樹高成長量としてモデル化を行った。一般に、樹高成長は、地形、土壌、気象等の立地条件の影響を受け、樹種や環境によってそれぞれ大きく異なっている。そのため、樹種と立地条件に対応した樹高成長の予測曲線式が多くの樹種を対象に報告されている。トドマツの樹高成長予測については、真辺（1982）や阿部（1989）がすでに報告している。阿部（1989）は、各種のトドマツ人工林の樹幹解析木から得られた樹高成長に、リチャード式、ゴンベルツ式、ミッチャリッヒ式を適合させ、その適合誤差について報告している。それによると、平均誤差率はリチャード式で4.8%、ゴンベルツ式で5.8%であるのに対し、ミッチャリッヒ式は解が発散する場合もあり、適合がよくなかった。したがって、本モデルにおいては連年の樹高成長に次に示すリチャード式による地位指数曲線式（阿部 1989）を採用した。

$$h_t = A(1 - e^{-kt})^{1/(1-m)} \quad (1)$$

ただし、 A は最大到達樹高、 k は成長速度を示すパラメータ、 e は自然対数の底、 t は樹齢、 m は成長の型を示すパラメータである。すなわち、樹齢 t 年における第1枝階の主軸（幹）の連年成長量（ Δh_t ）は、トドマツ地位指数曲線式から求められる当年の樹高（ h_t ）と前年の樹高（ h_{t-1} ）との差として定義した。

3) 1次枝の形状と成長モデル

(1) 輪生枝の発生数

幹から輪生状に発生する1次枝の数は、畠山(1981)によると、産地により変異があり、多雪地域でその数が少なく、寡雪地域でその数が多い傾向にあり、平均値は4本から6本の範囲にあることを報告している。そこで、本モデルにおいては、枝の発生数を、平均値5、標準偏差1.02の正規分布をすと仮定して枝階ごとに推定し、その整数値で表現することとした。

(2) 発生角度

主軸の先端にある頂芽の一つが鉛直方向に成長し主軸を形成すると同時に、他の側芽は斜め方向に成長し輪生状の1次枝を形成する。この時の1次枝の発生角度、すなわち第1枝階の1年生枝の初期発生角度は樹齢にともない増加することが予想され、樹齢 t 年における第1枝階の1次枝の発生角度(ϕ_t)は、次式により定義した。

$$\phi_t = \phi_s + \alpha_2 \cdot t \quad (2)$$

ただし、 ϕ_s は初期発生角度、 α_2 はパラメータ、 t は樹齢である。

(3) 樹冠角度

樹木の外観的な特徴を示す樹冠形状は、樹冠の鉛直方向の成長つまり樹高成長と水平方向の成長すなわち枝成長の2方向における相対成長関係により形成される縦断面的なプロフィールといえる。幹と枝の区別が明瞭な針葉樹においては、樹冠形状角度は梢端部の樹高成長量と1次枝の伸長量により決定され、1次枝の枝先と梢端を結ぶ直線と幹の中心軸とのなす角度として定義づけることができる。樹冠の形状角度は、地域により遺伝的な変動幅があり、地域の降雪量に応じて、 $19^{\circ} 10'$ から $23^{\circ} 20'$ までの地域的な変異があることが報告されている(畠山1981)。また、針葉樹は一般に主軸の樹高成長量は下位の輪生枝のそれよりも大きく、さらには輪生枝の個々の枝の成長差が少ないことから、樹冠は鋭角で均整のとれた円錐形の形状を呈する(佐藤・堤 1978)。こうした遺伝的な形状のほかに成長にともなう外観的な形状変化が考えられる。つまり、樹高成長の旺盛な時期においては枝成長に対して樹高成長が旺盛なことから、樹冠梢端は狭小で、樹高成長の低下とともに樹冠は広くなることが予想される。

そこで、成長にともなう樹冠形状の変化を表現する方法として、本モデルにおいては樹冠角度は樹齢にともない増加するものとし、樹齢 t 年における樹冠角度(θ_t)を次式により定義した。

$$\theta_t = \theta_s + \alpha_3 \cdot t \quad (3)$$

ただし、 θ_s は初期樹冠角度、 α_3 はパラメータ、 t は樹齢である。

(4) 初期伸長量

第1枝階の1次枝は、前段で述べた樹冠角度を一定に保ちながら発生することから、樹齢 t 年における1次枝の初期伸長量(bl_s)は、主軸の連年成長量、樹冠角度および1次枝の発生角度から次式により求められる。

$$bl_s = \Delta h_t \cdot \sin(\theta_t) / \sin(180 - \theta_t - \phi_t) \quad (4)$$

ただし、 Δh_t は樹齢 t 年における主軸の伸長量、 θ_t は樹齢 t 年における樹冠角度、 ϕ_t は樹齢 t 年における1次枝の分枝発生角である。

(5) 第2枝階以降の伸長量

樹高成長と第1枝階の1次枝の年伸長量の差が、梢端部の樹冠形状を決める重要な形状要素であるが、第2枝階以降の1次枝における年伸長量の差もまた、樹形全体のプロフィールに大きく関与し、樹種特有の樹冠形状を決める重要な形状因子といえる。いま、各枝階の年伸長量が梢端部から樹冠下

部まで同一とするなら、樹冠形は縦断的にみると梢端部を頂点とし、最下位の枝階を底辺とした3角形を維持しながら成長を続ける。しかし、実際の樹形は菱形から長卵型まで様々であり、こうした樹種特有の樹冠形状は、第2枝階以降の年伸長量の差により形成されるものといえよう。したがって樹形の成長過程をシミュレーション表示するためには、これらの形状要素を時間（樹齢）の関数としてとらえ、樹齢にともなう形状変化を表現可能なようにモデル化を行う必要がある。そこで、実際のトドマツの枝成長がどのような推移するかを

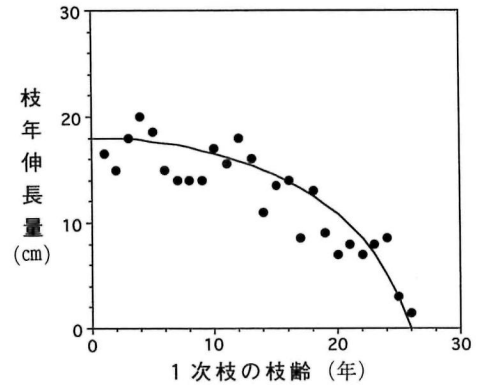


図-2 トドマツの枝齢にともなう年伸長量の変化

解析木をもとに、枝齢と年伸長量の関係を見ると図-2のようであった。図で示されるように1次枝の年伸長量は、枝の発生初期からある程度の伸長の変動は示すものの枝齢の増加とともに減少する傾向にあり、最終的には伸長の停止と枝の枯損に続く。樹形生成のためにはこうした枝伸長量の推移を数的にモデル化する必要がある。図から1次枝の年伸長量曲線として、放物線、楕円形状線、直線、2次曲線等が考えられる。これらの中で楕円形状線が枝伸長量曲線としての適合度が最も高いことから ($r^2=0.801$)、本モデルにおいては1次枝の年伸長量は経年的に減少し、設定した成長停止年数（枝寿命）で伸長量が0となるとして、各枝階の連年伸長量 ($\Delta b_l t$) を次式により求めた。

$$\Delta b_l t = b_l s \cdot \sqrt{1 - (b_t - 1) / (l_m - 1)} \quad (5)$$

ただし、 $b_l s$ は各枝階の初期伸長量、 b_t は枝齢、 l_m は各枝階の1次枝の成長停止年数である。

(6) 成長停止年齢

成長にともなう樹冠部の形状変化のひとつに、下部の1次枝の枯死が樹高成長とともに上昇する枯上がり現象があげられる。これは下部の枝が受光量の不足により枯死するためであり、特に、針葉樹の樹冠形状を特徴づける重要な形状要素といえる。こうした枝の枯上がり樹形を生成する手法として、ここでは枝の寿命、すなわち1次枝の成長停止年数をあらかじめ定義することにより成長にともなう樹冠形状の変化を表現可能な方法を検討した。ここでは1次枝の成長停止年数が、枝階にともない徐々に増加するとし、各枝階の1次枝の成長停止年数 (l_m) を次式のように定義した。

$$l_m = t_s + \alpha_6 \cdot (t_n - 1) \quad (6)$$

ただし、 t_s は初期値、 α_6 はパラメータ、 t_n は1次枝の発生年次である。

(7) 着枝角度の変化

樹冠形状を特徴づける形状要素として、枝の着枝角度がある。枝の角度は1個体のなかでも位置により異なり、着枝角度はその発生初期である梢端部で狭く、幹の下方に向かって次第に広がる傾向にある。これは、おもに枝の重量が増すためと考えられるが、ここでは n 枝階における1次枝の着枝角度 (ϕ_n) は枝齢にともない増加するとし、次式の近似式により定義した。

$$\phi_n = \phi_t + \alpha_7 \cdot b_t \quad (7)$$

ただし、 ϕ_t は樹齢 t 年に発生した各枝階の初期発生角度、 α_7 はパラメータ、 b_t は枝齢である。

(8) 枯れ枝の着枝年数

針葉樹は広葉樹と異なり、枯れ枝はかなりの期間にわたり幹に残存する。このため、枯れ枝の存在は成長にともなう自然的な樹冠の形状変化を表現する上での重要な要素となる。枯れ枝の残存は樹冠の印象を著しく変えるものではないが、枯れ枝を表示することにより自然な樹形が得られることがわ

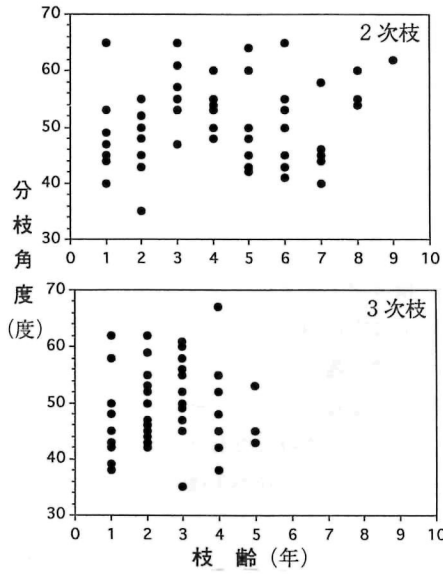


図-3 トドマツの枝齢と分枝角度の変化

かる。枯れ枝の残存は枝の太さと関連すると考えられるが、本モデルにおいては枯れ枝の着枝年数を枝の発生時に設定し、発生年の古い枝から順次落枝するよう定義づけした。

4) 2次枝以下の各分枝階の形状と成長モデル

(1) 分枝角度

供試木の枝齢と2次枝階以下における分枝の発生角度との関係を図-3に示した。図で示されるように、いずれの分枝階においても分枝の発生角度の分散は大きく、分枝と枝齢との関係も認められないことから、各分枝の枝角度は発生当初の分枝角度を保ちながら成長しているといえる。したがって、本モデルにおいては、分枝の発生角度を45°とし、40°から60°の範囲において一様乱数により発生させた。

(2) 伸長量と発生率

前段で述べた1次枝の形状が樹種特有の外観的な樹冠形状を特徴づける形状要素の一つとするなら、2次枝以下の分枝の発生消長は、成長にともなう樹冠部の形状変化や枝の疎密感等単木形状の個体間差異を表現するうえで重要な形状要素となる。これまで、トドマツの枝齢と枝葉量等枝階別枝葉構造については中須賀ら(1972)、阿部(1976)、水井ら(1990)らにより報告されているが、いずれも現存量や成長量等量的解析を目的としていることから、形状定義としての枝の成長量や分枝の発生頻度等コンピュータグラフィックスによる樹形生成に必要な事項に関する内容とはなっていない。したがって、ここでは画像表示を目的に、2次枝以下の各分枝の成長量と発生率を供試木の解析データをもとにモデル化することとした。図-4は各分枝の伸長量を上位分枝階の伸長量との関係でみたものである。各分枝階の当年の伸長量は上位分枝の当年の伸長量にほぼ直線的に回帰するといえる。したがって、ここではこの近似式を用いることとし、各分枝階の初期伸長量は上位分枝階の伸長量に比例す

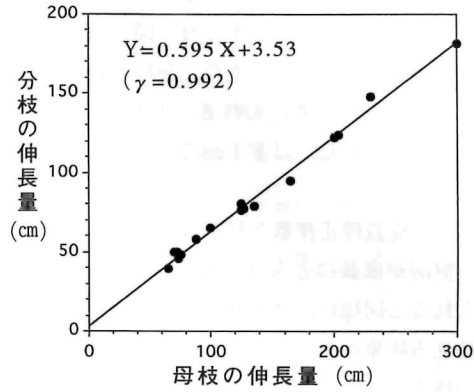


図-4 トドマツの母枝伸長量と分枝伸長量の関係

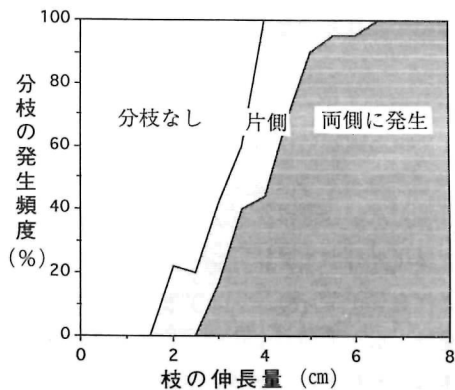


図-5 トドマツの母枝伸長量と分枝の発生頻度との関係

るよう定義づけを行った。また、分枝の発生率は供試木の調査データをもとに伸長量との関係からみると図-5のとおりであった。図に示されるように、分枝の発生は上位の分枝階の伸長量と密接な関があることがわかる。また、分枝の発生は、樹形表示のためのモデルとしては関数式よりも階級による推定が適切と考えられることから、分枝の発生は上位分枝階の伸長量が7 cm以上の場合には100%発生し、以下し、以下1 cmごとに、一定の割合で低減させ、2 cm未満で分枝を停止するように定義した。

(3) 成長停止年数と枯れ枝の着枝年数

樹高が成長にともない枝階下部の一次枝が順次枯損し、樹冠が上昇するいわゆる枯上がり現象がみられると同様に、2次枝、3次枝においても樹高成長とともに樹冠の内部から枝の先端方向に次第に枯れる現象がみられる。これらは、各分枝階における枝の寿命に起因し、その寿命が長ければ樹冠部の枝密度も高く、枝の寿命が短くなるにしたがい枝密度も疎となる。こうした樹冠部の疎密度の表現は、成長にともなう樹冠部の形状変化や個体差異を表現するうえで不可欠な形状モデルといえる。そこで、枝の成長に従い徐々に基部が枯上がり、自然的な印象を持つ枝形状が生成されるように、2次枝以下の枝寿命を次式によりモデル化した。

$$S_n = \alpha_8 \cdot S_{n-1} \quad (8)$$

ただし、 S_{n-1} は直近上位の分枝階の枝寿命、 α_8 はパラメータである。また、枯れ枝の着枝年数は、1次枝と同様に枝の発生時に設定し、発生年の古い枝から順次落枝すると定義した。

5) 直径成長のシミュレーションモデル

リアルな樹形表示のためには、枝の長さや数に見合ったバランスのとれた枝や幹の太さが必要となる。

直径成長のシミュレーション手法として、樹高と直径の相対成長関係から幹曲線を推定し、樹幹の形成過程をシミュレーションする手法がある。これは、垂直方向の成長である樹高成長は地位の影響を強く受け、水平方向の成長である肥大成長は立木密度に鋭敏に反応し、その結果縦方向と横方向に成長差が生じ、それぞれの個体の成長環境に応じて幹形が形成される(小林 1990)。こうした樹幹形状を表現するため、これまで多くの幹曲線が報告されているが、本モデルにおいては、トドマツの樹高と直径の相対成長関係を示すアロメトリー式(小林 1990)を用いることとした。これは、任意の高さにおける幹の直径を、次式で示される産地および樹冠級に応じたトドマツの相対成長曲線式により算出する方法である。

$$d = \alpha_9 \cdot (h - h_l)^{\beta_9} \quad (9)$$

ただし、 d は任意の位置の直径、 α_9 、 β_9 は幹直径の相対成長係数と指数、 h は樹高、 h_l は任意の断面高である。

4 単木形状の画像生成

1) 成長シミュレーション表示の手順

トドマツの単木形状および成長モデルは、モデルの原型を作成し、コンピュータグラフィックス画像でシミュレーションを行い、樹形に関与すると考えられる形状因子を推定し、さらに様々な形状因子の組合せから樹形生成のための適正なパラメータを抽出し、モデル化した。成長シミュレーションおよび表示の処理手順は図-6に示した。まず、成長パラメータをセット、データの初期化及び1年目の成長計算を行い、次に樹齢2年から指定された樹齢までの成長を計算するループに入れる。ループでは仮想空間中を成長する枝先の軌跡を求める。成長のループを抜けた後で枝階毎に1次枝の消失を求め、幹や枝の太さを求める。その後、得られた樹木の形状データをもとにして、コンピュータグラフィックスで表現する。樹木の表示は節(1年間の成長分)単位で簡易な優先順位法を用いて緑あるいは黒で塗りつ

ぶす方法で行った。ただし、成長のループでは各成長点について以下の判断を行った上で成長量の計算を行う。まず、その成長点がパラメータで与えられた最終樹齢まで残っているかどうかを判断し、消失しないで残っている可能性のある枝を判断して成長させる。さらに成長可能な親枝の最小値を設定して、親枝の長さがそれよりも長い場合だけ成長させる。これらにより表示結果に大きな影響を及ぼさない領域における計算が省略され、表示のための計算時間を短縮することができる。また、計算した枝先座標に対して1次枝の場合には反重力性を表現するために上方向へ、2次枝の初期成長の場合には、枝の乱雑さを表現するためある変動幅で乱数を用いて上下に変化をつけた。なお、成長シミュレーション及び結果の表示を行うプログラムはC言語で作成し、ワークステーション上で実行した。

前項で述べた各種のパラメータを変化させることにより、以下に示すさまざまな樹形が生成される。

2) 樹冠形状の生成と評価

樹種の形状を特徴づける形態因子として、外観的な樹冠

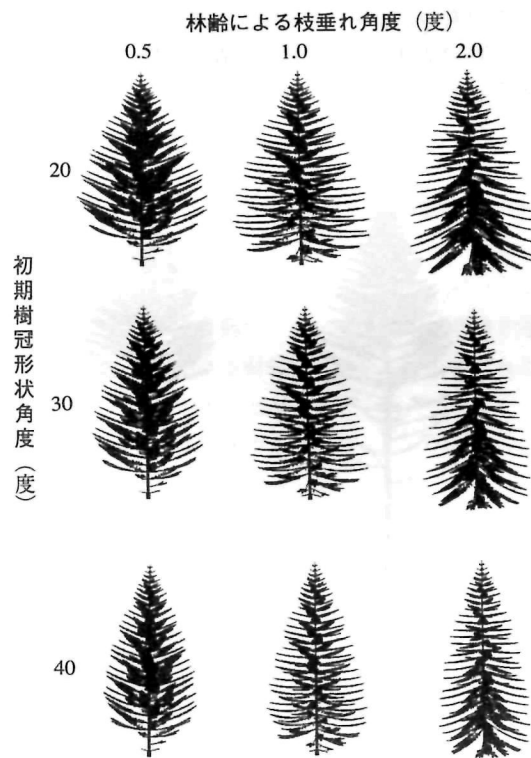


図-7 樹冠角度と枝垂れ角度の違いによる樹形の変化

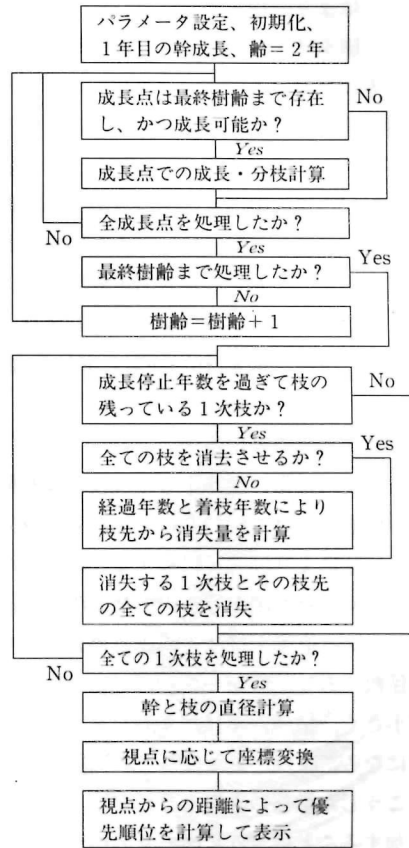


図-6 トドマツ成長シミュレーションの表示手順

形状と樹冠部における枝の着枝角度、密度、幹や枝の太さ等があげられる。これらは、樹木各部における種特有の成長型や遺伝的な形態に加え成長過程において獲得された諸形質の相互作用により樹種特有の個体が形成されたものといえる。樹冠の形状を印象づける外観的な要因として、樹冠形状角度と枝の着枝角度があげられる。樹冠形状角度は、樹高成長と枝成長との相互作用により形成され、枝の着枝角度は枝重の増加とともに下垂する。そこで、これらのうち樹冠形状に関する樹冠角度と枝垂れ角度の組合わせにより画像表示した結果、図-7に示す様々な樹冠形状をもつ樹形が生成された。図で示されるように枝の伸長量と着枝角度のパラメータを変化さ

せることにより、樹冠が大きく、枝張りの印象が力強いモミ属タイプの樹形から梢端が鋭角で枝張りの狭小なトウヒ属タイプの樹形等さまざまなタイプの針葉樹の樹形表示が可能である。これらのことから、樹冠形状角度と枝垂れ角のパラメータは1次枝の伸長量ひいては全体の樹形に大きく関与し、特に針葉樹の形状因子として樹種特性に大きく影響していることがわかる。なお、これらの中でトドマツの樹冠形状をよく表しているパラメータとしては、樹冠角度が 20° 、枝垂れ角度は0.5から1.0付近が最も妥当な数値といえる。

3) 樹冠疎密度の表現手法

また、枝の寿命に関与する1次枝の成長停止年数と各分枝階における枝の寿命を決めるパラメータの組み合わせにより図-8に示すように、枝の枯上がりの程度や樹冠の疎密感等の樹勢表現が可能である。パラメータは直近上位枝階の成長停止年数を求める際の係数であり、値が小さいほど樹冠内部の枝の成長が小さく、枯死、落枝が多くなり、樹勢が衰えた樹形になる。また、針葉樹特有の樹冠形状に枯れ枝の残存があり、より自然的な樹形を表現するためには、こうした細部の表現も必要となる。いま、各分枝階枝の成長年数に枯れ枝の着枝年数のパラメータを付加することにより、図-9の樹形がえられる。図-9のaとb、およびcとdは同じ成長停止年数

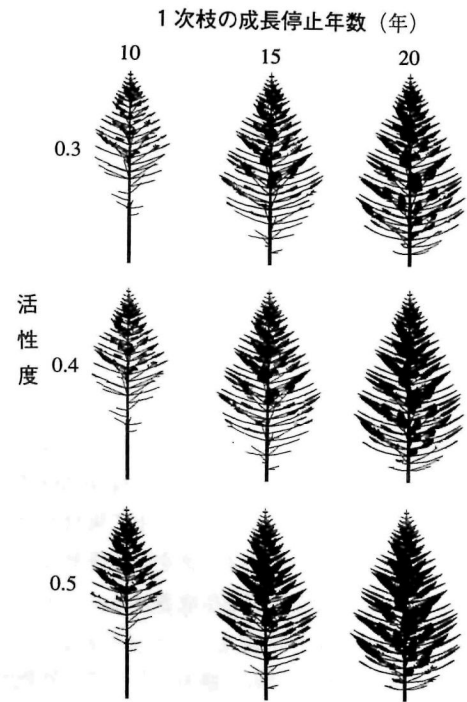


図-8 枝成長停止年数による樹形表示

を付加することにより、図-9の樹形がえられる。図-9のaとb、およびcとdは同じ成長停止年数

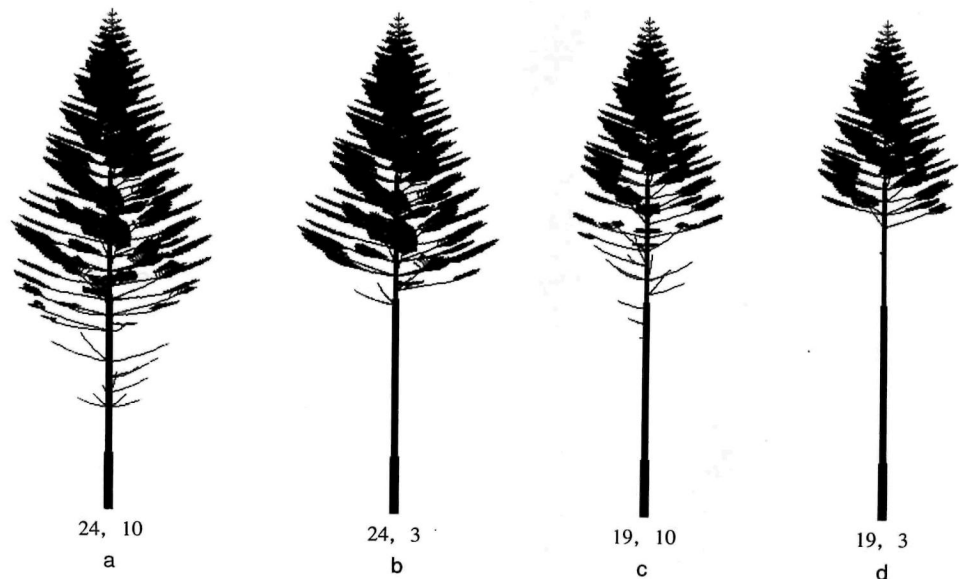


図-9 枝樹命と残枝年数の違いによる樹冠形状の変化

で着枝年数の異なる例であり、bとcは同じ残枝階で成長停止年数と着枝年数が異なる例である。着枝年数のパラメータを変化させることにより、樹齢にともなう枝の枯上がり状態がより自然に近い形で表現することができる。このように、樹形に関与する形状因子のパラメータを変化させることにより個体全体のボリューム感を変えることができ、樹木の勢いや旺盛さの表現が可能である。

4) 針葉樹の樹種表現

トドマツの樹形データを用いて作成した成長モデルと、1次枝以下の形状パラメータの組合せを変化させることにより、図-10に示す本道の代表的な針葉樹であるトドマツ、エゾマツ、カラマツ3種についての樹形が得られた。このことから、他の針葉樹についても形状生成モデルの改良とパラメータの探索により樹種表現が可能であると考えられた。

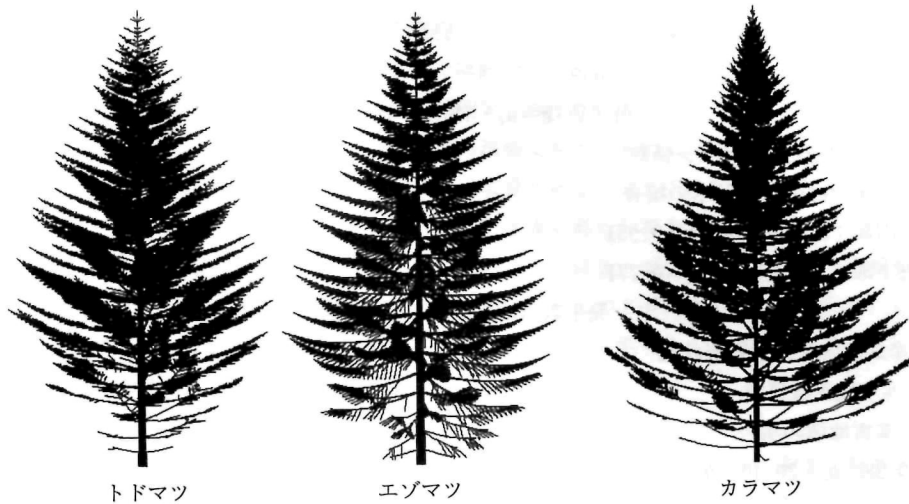


図-10 本道の代表的針葉樹3種の樹形表示

5) 単木形状の成長シミュレーション

林業分野において景観シミュレーションの利用を考慮すると、遺伝的な形状に加え、成長過程における形状変化に対応できる樹形生成モデルが必要である。例えば、現状林分を景観としてシミュレートし、将来の林分景観を示すことができれば、視覚的な評価に基づく施業計画が可能となる。従来の林分構造の予測では数値のみで表示されていたが、コンピュータグラフィックスによる景観シミュレーションの手法を活用することにより、新しい計画手法へと発展させることができる。

そこで、個体の成長過程のシミュレーション、すなわち成長にと

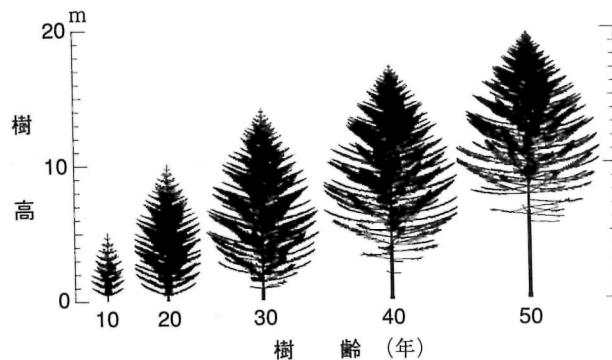


図-11 単木形状の成長シミュレーション表示

もなう樹冠形状の時間的変化を表現するために、上述した各種のパラメータを時間（樹齢）により変化させて画像表示することを試みた。その結果、図-11に示すように、時間の変化（樹齢）に対応した単木形状を得ることができた。これらの形状は、現実の単木をよく表現しているといえ、トドマツ単木の成長過程を自然に近い姿で再現することができた。以上のように、樹齢に対応したパラメータを使用することにより自然な印象をもった単木形状の成長シミュレーション表示が可能である。

作成したトドマツ単木の成長モデルのうちおもな形状要素の計算式とパラメータ例を以下に示す。なお、(1)、(2)は幹の成長に関するもの、(3)~(11)は1次枝の発生と成長に関するもの、(12)、(13)は樹齢増加にともなう形状変化に関するものである。

$$\text{樹高成長量} = A(1 - e^{-kt})^{1/1-m} \quad (1)$$

A, k, m : 地位指数に応じたパラメータ

t : 樹齢

例. 1等地で地位指数が28の場合

$$A = 28, k = 0.0348, m = 0.3639$$

$$\text{幹の直径} = a_2 \cdot (\text{樹高} - \text{地上高})^{b_2} \quad (2)$$

a_2, b_2 : 幹直径の相対成長係数

例. 函館地区の準優勢木の場合

$$\text{樹冠内部} : a_2 = 2.245, b_2 = 0.951$$

$$\text{樹冠下部} : a_2 = 3.336, b_2 = 0.771$$

$$\text{発生数 (輪生枝数)} = a_3x + b_3 \quad (3)$$

x : 産地に応じた樹冠形状比

a_3, b_3 : 輪生枝係数

例. 多雪地域の場合

$$x = 0.38, a_3 = 20.40, b_3 = -3.188$$

$$\text{分枝角度} = (\text{樹齢} - \text{発生年次}) \cdot \text{増加率} + d_0 + \text{枝垂れ角度} \quad (4)$$

$$\text{増加率} = (d_1 - d_0) / \text{個体の寿命} \quad (5)$$

$$\text{枝垂れ角度} = \text{枝齢} \cdot \text{年枝垂れ角} \quad (6)$$

d_0 : 初期分枝角

d_1 : 最終分枝角

例. 初期分枝角度 = 60, 最終分枝角度 = 90,

$$\text{個体の寿命} = 100, \text{年枝垂れ角} = 0.5$$

$$\text{当年伸長量} = \text{当年総伸長量} - \text{前年総伸長量} \quad (7)$$

$$\text{総伸長量} = \text{初期伸長量} \cdot \text{枝齢}^\alpha \quad (8)$$

$$\text{初期伸長量} = \text{樹齢に応じた当年の樹高成長量} / \sin(180 - \text{樹冠角度} - d_0) \cdot \sin(\text{樹冠角度}) \quad (9)$$

$$\text{樹冠角度} = \text{初期樹冠角度} \cdot \text{樹齢}^\beta \quad (10)$$

d_0 : 初期分枝角度

例. $\alpha = 0.9$, 初期樹冠角度 = 20, $\beta = 0.18$

$$\text{直径} = a_{11} \cdot (\text{枝先からの枝長さ})^{b_{11}} \quad (11)$$

a_{11}, b_{11} : 実測データから求めた成長係数

例. $a_{11} = 0.0595, b_{11} = 0.717$

$$\text{成長停止年数} = \text{直近上位枝階の成長停止年数} \cdot \text{活性度} \quad (12)$$

$$\text{枯れ枝の消失率} = \text{成長停止後の経過年数} / \text{着枝年数} \quad (13)$$

また、3次枝の発生数は親枝である2次枝の伸長量に応じて発生させるが、その発生割合は親枝長が6.5cm以上の場合が100%、5.5cm以上は97.5%、5cm以上は95%、4cm以上は72%、3.5cm以上は50%、3cm以上は29.5%、2cm以上は10%、2cm未満は0%等とした。

第2章 広葉樹型の樹形生成モデル

1 はじめに

広葉樹は葉の形態をはじめ、分枝様式や生活様式等が、針葉樹とは明かに異なる。樹冠部の形状も、針葉樹が幾何学的な形状であるのに対し、広葉樹は樹冠全体が丸みを持つ樹形を呈する。前章において針葉樹の単木形状表示に関し、これまでの報告例や実測データを補完値として、各パラメータの値を樹齢との関数としてとらえ、樹齢増加にともなう形状変化を始め、様々な樹形が表現可能な成長モデルを提示した。一方、自然な枝振りをもつ広葉樹を表現するためには、分枝システムや成長パターン等の遺伝的に定まる形状形態に加え、光を求めて成長した軌跡のような枝振り、受光量に対応した伸長成長と肥大成長、さらには受光量の不足にともなう枝の枯死等、個体成長の過程で環境の影響を受け形成された形状を表す成長モデルが必要とされる。特に、枝の疎密度や光を求めて成長した様子等の自然な枝振りを表現するためには関数モデルによる樹形生成には限界があり、広葉樹の樹形表示には新たな成長モデルの開発が必要とされる。そこで、本研究では、樹形生成に最も影響を与えられられる光環境の影響、すなわち上方の枝葉の存在や隣接木等受光量に対応した成長、消失等の成長モデルを構築することを検討した。これにより、自然的な樹形の表現が可能になるものと考えられる。そのため、これまでの報告例や実測値をもとに広葉樹の樹形表示のための成長モデルを開発し、単木の成長シミュレーションおよび競合成長を考慮にいたした樹群の表示を試みた。

2 研究方法と材料

コンピュータグラフィックスによる樹木の生成モデルは、これまで述べたように数多く報告されている。このうち形状定義の手續きに環境との対話性を取り入れた成長モデルに関しては奥村・小川(1986)、金丸ら(1987)、中島ら(1988)、安居院ら(1991)、鈴木ら(1992 a)による報告がある。また、Chibaら(1993)は光環境との対話性に加え、成長ホルモンを想定しての成長モデルを提唱した。このモデルによって生成された樹形は、個体内の枝の粗密度や丸みを帯びた樹冠の形成、あるいは光を求めて成長した様子等が表現でき、それまでの乱数等によって樹形に変化をもたせるモデルに比べ、非常に生き生きとしたものであった。しかし、このモデルは樹種共通の樹形らしさの表現を目的としたものであり、受光量のシミュレーション時に葉の形状や葉の付き方を簡略化し過ぎたり、受光量と成長量との対応関係がない等樹種表示のための成長モデルとしては不十分なものといえる。そこで、本研究においては、実際の樹形解析データを用い、幹や枝の発生と成長、樹齢にともなう形状の変化等の樹種特性を表現できるような成長モデルを作成することを主眼とし、光環境との相互作用にもとづく成長によって形成される樹形を表現する手法について検討した。ここで提案するモデルは、互いに環境(光、自己庇陰、隣接木)の影響を受けながら成長する樹木の成長変化を樹形の変化としてコンピュータグラフィックスを用いて視覚的に表現するものである。本研究では光環境の影響を受けながら樹形が形成されるシミュレーションモデル(以下成長モデルと呼ぶ)を考察し、自然的な枝振りを持つ広葉樹形生成のための成長モデルを開発した。今回の成長モデルの作成にあたり次のことを検討した。

- (1) 自然的な樹形表示のための形状生成モデル
- (2) 伸長部における受光量のシミュレーション

(3) より明るい方向に向かう枝の探索性のモデル

(4) 受光量に見合った成長量の実現

(5) 受光量の不足にともなう枝の枯死と消失

ここでは、基本的な樹形形成モデルの開発を目的として、北海道内に広く生育するホオノキを選定し、樹冠形状の解析結果を補完データとして樹形モデルを作成し、単木の成長シミュレーションと樹形表示を行った。なお、ホオノキを樹種選定した理由は、枝や葉数が少なく成長シミュレーションのための計算時間が短く、モデルの評価や改良に要する時間の短縮化が図られるためである。作成した形状と成長モデルは、まずモデルの原型を作成し、表示画像でシミュレーション結果を評価し、モデルの改良を行う方法で研究を進めた。モデルに用いた供試木は美唄市光珠内の北海道立林業試験場実験林にある広葉樹二次林で、日当たりが良好で隣接木の影響を受けていないと思われる個体3本を選定し、解析を行った。解析木の一覧を表-3に示した。

3 単木形状の生成モデル

リアルな樹形を生成し表示するためには、これまで述べた成長モデルの他に、樹形の基本となる枝や幹等の骨格形状を決める分枝モデルや着生葉の形状等を決める着葉モデルが実際の樹木に近いことが必要になる。枝の太さや枝密度、分枝角、個葉の形態と着生状態等は、広葉樹の樹種特性を表現する上で特に重要な形状要素となる。景観施業計画の画像化の見地からは、実存する樹木がモデル化されることが重要であり、特に近景では樹種が特定できるレベルのモデルが望まれている(本條, 1992)。そこで、本研究においても、実測データにもとづいた形状モデルの作成が植物学的にも正確な画像が得られるとの考えから、樹種表示を目的にした分枝モデルを作成した。良好な成長モデルと分枝モデル、着葉モデルの組合せにより、樹種特性を持つ樹形生成、同一樹種における多様な樹形生成、さらには樹齢増加にともなう樹形の経年変化や季節変化等のシミュレーションが可能とな

表-3 ホオノキ樹幹解析木一覧表

資料	樹齢	樹高	胸高直径	枝下高	樹冠直径
No1	12年	6.2m	11.5cm	2.0m	2.6cm
No2	14	6.6	12.3	2.6	3.2
No3	16	8.4	14.2	2.3	3.8

表-4 ホオノキの形状と成長に関与するパラメータ

形状要素		パラメータ
1 次 成 長	幹・枝	主軸伸長量 成長方向 1次伸長量 親枝の方向
	輪生状態	葉数、葉長 着葉位置 葉序 葉柄長 水平角度 開空度 葉数 葉数、葉序角度 葉長
2 次 成 長	幹	主軸伸長量 成長方向 側枝数 分枝位置 分枝方向 側枝伸長量 開空度、伸長開始開空度、 最大伸長量、光飽和係数 梢端回転角度 幹伸長量、分枝数係数 側枝数 分枝角度、枝序 主軸伸長量
	枝	主軸伸長量 成長方向 側枝数 分枝位置 分枝方向 側枝伸長量 開空度、伸長開始開空度、 最大伸長量、光飽和係数 親枝の方向、最大受光方向、 光探索開始開空度、 光探索自由度、 天頂方向成長係数 1次枝伸長量、分枝数係数 側枝数 親枝の方向、枝序 主軸伸長量
	側生状態	葉数 葉長 着葉位置 水平角度 葉序 主軸・側枝の伸長量、着葉間隔 着枝の伸長量、葉長係数
直 径	幹・枝	当年直径 直径成長量 先端からの長さ、形状係数 当年枝断面積合計、 直径配分系数

る。そこで、形状と成長に関与するパラメータとして表-4に示した項目を取り上げ、針葉樹と同様に、広葉樹の樹形生成のための基本的なモデルを作成した。

1) 分枝モデル

樹木の分枝パターンは樹形表示を行うための基本的なモデルであり、これまでに多数の手法が報告されている。Oppenheimer (1986) は、枝分かれのフラクタルモデルを提案し、Aono・Kunii (1984) はAシステムと名づける対話的な枝分かれ規則を利用する生成アルゴリズムを提案し、Lindenmayer (1968) や Pruiankiewicz ら (1988) はLシステムと称する成長モデルを提唱している。このように樹木の分枝システムに関する論文は多数あるが、必ずしもリアルで自然的な樹形を目的としたものでないため、目的とする樹種を表示するのに適していない。そこで、本研究においては樹種表示を目的に、これまでの報告例や供試木の解析データにもとづき分枝モデルを作成した。ホオノキは枝先に大きく発達した頂芽を形成する頂芽型の樹種であり、伸長期のはじめにこの頂芽が展開して、伸長し新条となる。伸長停止期にふたたび頂芽を形成して成長を停止する単軸分枝型の成長を示す(斎藤・菊澤 1976)。分枝(側生枝)は、伸長が旺盛な当年生の枝から発生し、主軸(頂芽が伸長した枝)の成長は常に側枝のそれより旺盛である。また、開葉の様式は春先に多くの葉が一斉に開葉し、その後も徐々に葉を展開する一斉+順次型の樹種である(菊沢ら 1983)。全体の単木形状は、こうした分枝の発生と成長の繰り返し、さらには伸長と肥大成長と落枝により樹種特有の樹形が形成されていく。したがって、本モデルにおいても実際の分枝や開葉様式に対応した分枝モデルを作成した。

2) 分枝の発生数と発生角度

分枝の発生数と発生角度は、樹種における遺伝的な形状特性と考え、供試木の解析データを用いてモデルの検討を行った。まず、枝の伸長量と分枝の発生との関係を見ると図-12に示す結果が得られた。図に示されるように分枝の発生とその数は主軸の伸長量との関係が認められ、分枝は主軸の伸長が20cm以上から発生し、その数は伸長量に応じて増加する傾向にあった。そこで分枝の発生数は一定割合で一樣発生する整数値で定義した。また、分枝の発生角度は供試木の結果から図-13に示した頻度分布が得られ、その平均値は40から50°の範囲にある。したがって、本モデルにおいては分枝は平均発生角度45°、標準偏差15.0の正規分布をするものとし、一樣乱数を用いて発生させた。

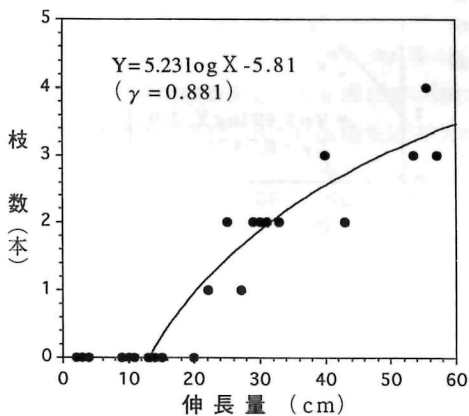


図-12 ホオノキの枝伸長量と分枝の発生数との関係

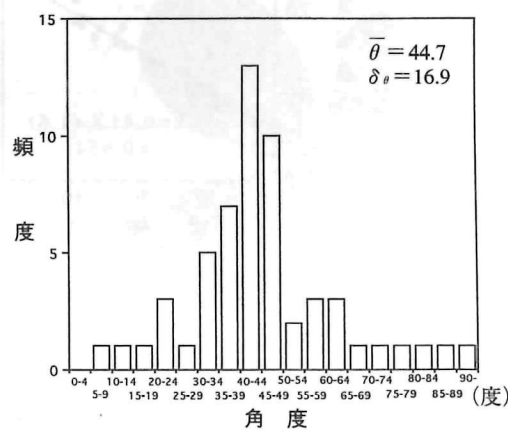


図-13 ホオノキの分枝発生角度の頻度分布

3) 個葉形態と配置

樹木の外観として、葉の形態も大きな役割を果たしている。特に、葉数や個葉形態は、近景における

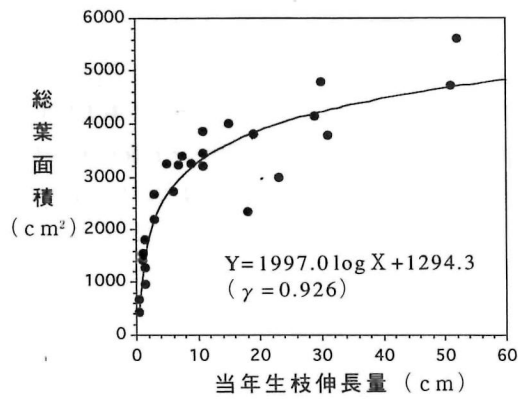


図-14 ホオノキ当年生枝伸長量と着葉総面積の関係

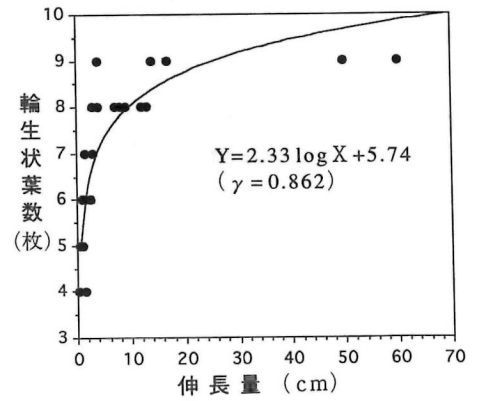


図-15 ホオノキの枝伸長量と葉数との関係

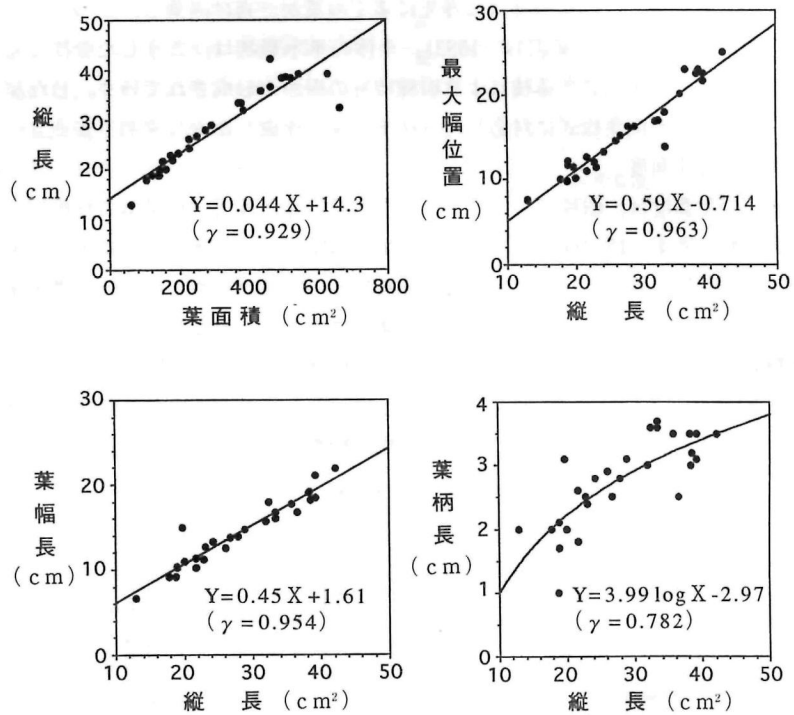


図-16 ホオノキの個葉形態の関係図

樹種表示において、また成長モデルの基本となる受光量のシミュレーションを行う上においても最も重要な形状要素といえる。そのため、同一個体において多様な個葉形状と、それらを樹木に配置する場合の着葉形態、枝長に応じた数と大きさ等を示すモデルが必要となる。そこで、本研究においては枝長に応じた葉数や葉身長、葉幅長、葉柄長等の個葉形態に関し次の手法によりモデル化した。まず、解析木のデータから枝と葉面積の関係を求める。図-14はホオノキの1年生枝の伸長量と総葉面積の関係をみたものである。図で示されるように両者に相対成長関係がみられ、その関係式から枝の伸長量に対応し

た総葉面積が算出される。また、枝の当年伸長量と葉数との間には図-15のような関係が認められた。図から枝の伸長量に応じた葉数を整数値で推定することができる。したがって、枝当たりの総葉面積と葉数との関係から個葉の平均葉面積が算出される。また、図-16-1に示したように、葉面積と縦の長さには密接な関係があり、両者の関係式から、葉面積に応じた縦長が求められる。さらに、個葉形状の実測値から葉の幅および最大葉幅の位置、葉柄長についても、葉長との関係から図-16-2~4に示すように縦長を説明変数に、最大幅位置、葉幅、葉柄長をそれぞれの目的変数とした関係式を推定した。最後に、変動係数をパラメータで与え、葉序に基づく所定位置に配置し、画像表示を行った。

4 受光量を考慮した成長モデルの開発

1) 受光量のシミュレーションモデル

成長モデルの第1要件である光環境を考慮したモデルにおいては、受光量計算のモデル化が重要である。これまで、樹木の形状を表現する受光シミュレーションとしては、鉛直方向からの光（中島ほか1988）、水平面から上の半球方向からの光（奥村・小川 1986）や枝先に葉球とよばれる遮光球を考慮した受光量の計算（金丸 1991）、葉球のかわりに葉板を考慮して真上からの光で受光量計算を行うモデル（安居院ほか 1991）等、多くの受光モデルが提案されている。しかしこれらのモデルには現実の葉の着き方や葉面積等は考慮されていない。そのため、コンピュータグラフィックスにより良好な樹形を得るためには、より現実に近い形で受光量の計算をした方がよいと考え、モデルの検討を行った。そこで本研究では、葉の形状や配置を現実に近い形で配置し、受光量の計算方法についても林内等の照度の測定に用いられている全天空写真方式をシミュレーションする方法として適用した。この方法は、魚眼レンズを用いて撮影して得られた林冠の全天空写真から、画像上の空の部分の面積割合（開空度）を求め、この数値を林内の光環境指標として応用したものである（玉井・四手井 1972, 早稲田 1983, 安藤 1983）。そこで、本モデルでは成長点を投影の中心として、受光量に影響を及ぼす葉や幹、枝等の遮光体を球面投影した魚眼図のシミュレーション画像を作成し、開空度（空の面積比）をその成長点での受光量としてとらえる方法をとった。図-17は、伸長部における全天写真を想定してのシミュレーション画像を表示した例である。開空度0は完全に天空が覆われている状態で受光状態が最悪の場合を表し、開空度1は成長点より高い位置に遮蔽物がなく非常に良好な受光状態であることを表している。また、天空を半球と仮定し、さらに太陽光は天空のいずれの方向からも同量と仮定し、全ての成長点で受光可能な光の総和を1とした。この方法は、従来の樹形生成モデルの受光量計算で用いられていた球や円盤が枝先についていると仮定する方法（安居院ほか 1991）や葉球を想定してのモデル（金丸ほか 1991）と大きく異なっており、より実際に近い形で受光量のシミュレーションを行うことができる。

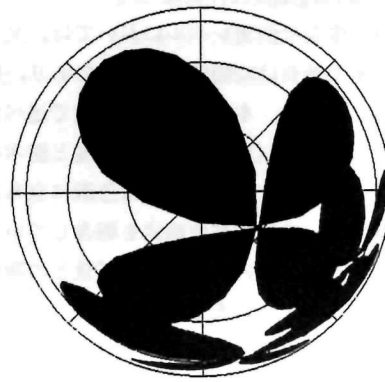


図-17 全天空画像シミュレーション

なお、個葉形態については前述したように、枝の伸長量に応じた葉の総面積と着葉総数を求め、またその値をもとに葉長、葉幅等を求め、着葉位置も定義して、個葉を1枚づつモデリングした。

2) 屈光性および光探索性

広葉樹は枝先がより明るい方向へ向かうように成長する性質が強い。このような光に向う性質を屈光

性という。すなわち、より多くの葉が効率よく光を受けるために、受光量の少ない枝はより光を受けやすい方向に成長する。実際の樹木を観察すると、このような成長により形成されたと思われる枝振りが多くみられる。コンピュータグラフィックスにより樹木の自然な枝振りを表現するためには、その成長点からみて明るい方向を捜し出し、次期の成長方向を決める必要がある。このような屈光性を成長モデルに付加することにより、枝の先端や葉の方向等微妙な形状表現において、大きな効果を持つものと考えられる。そこで、本研究では屈光性および光探索性を以下のようにモデルのなかで定義した。まず、光が十分に当たっている成長点では枝は天頂方向を目指して成長する。受光量があるしきい値（本モデルでは光探索開始受光量と称する）以下の成長点では基本的に光を求めて明るい方向へ向かおうとするが、枝先が旋回して回避できる範囲、すなわち、枝の光探索自由度には制限があり、天頂方向への成長の仕方も樹種によって異なると考えられる。例えば、1年で天頂方向に伸びる樹種もあれば、毎年少しずつ天頂方向へ向かう性質の樹種もあると考え、この性質もパラメータで与えた。まず、最も明るいメッシュを選出し、次期の成長方向と候補点との角度を求める。次に最も小さい角度の方向を選出し、その角度が回旋可能な角度の範囲内であればその方向を次期の成長方向として決定する。最小角度が回旋可能な範囲を越えている場合にはそのメッシュの方向に成長できず、次に明るいメッシュを選んで同様の処理を行う。また、こうした成長点では基本的に明るい方向へ向かうが、成長可能な範囲、つまり枝先が旋回できる角度には制限があると仮定し、これもパラメータで与えることとした。

こうしたモデルにより、光が最も多くあたる方向に枝の成長を補正することができ、光を求めて成長した軌跡のような枝振りの表現が可能と考えた。なお、光探索開始受光量や光探索自由度等は樹種によって異なるものと推定され、これらのモデルにパラメータを設定することにより樹種特性に対応した屈光性、光探索性を表現することを試みた。なお、本モデルにおいての枝の伸長方向の判定にあたっては、図-17で示したように成長点での受光シミュレーション画像を天空の経度方向に8分割、緯度方向に4分割した32メッシュに区分し、それぞれのメッシュごとの開空度を求め、成長点から見て最も明るい方向を求めて成長するよう定義した。

3) 受光量に対応した伸長量

光環境と成長は個葉レベルにおいては、光-光合成曲線として明るさと総光合成量で表現される。しかし、樹木の伸長は時間による積分であり、個葉レベルの光条件をそのまま枝伸長量に変換するには無理がある。そこで、本モデルでは前段で述べた開空度をもとに、受光量に対応させた枝の伸長モデルを検討した。石塚ら（1989）は林内照度と樹木の稚幼樹の伸長量との関係について光-光合成曲線同様、散光照度の増加とともに伸長量は急激に立ち上がるが、次第に頭打ちになる傾向を確認し、林内照度と枝伸長量について飽和型曲線式を報告している。そこで、本モデルでは、受光量に対応した幹、枝の伸長量については、林内照度と枝伸長量との関係式を応用して次式のように表した。

$$L = A \{ 1 - e^{-k(I - I_0)} \} \quad (14)$$

ただし、 L は伸長量 (cm)、 A 、 k はパラメータ、 I は開空度、 I_0 は伸長を開始する開空度である。

伸長量は開空度の増加にともない立ち上がり、開空度の増加につれ、次第に頭打ちの曲線が示され、伸長開始時のパラメータ I_0 と伸長係数 A 、 k のパラメータを樹種の光特性に合わせて設定することによって樹種特有の樹形が表現可能と考えられる。

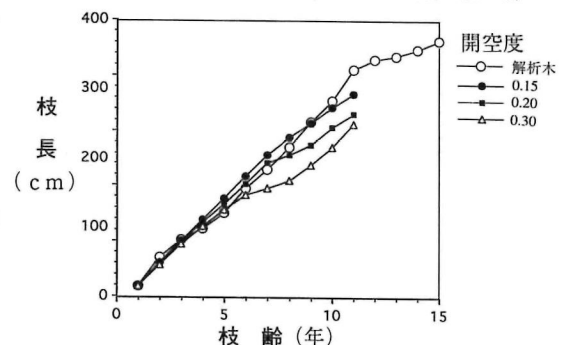


図-18 開空度のパラメータと枝成長シミュレーション曲線

図-18は、パラメータを一定にし、成長開始時のパラメータを変化させて得られた枝の成長シミュレーション曲線と供試木における枝成長曲線を比較したものである。シミュレーション、供試木とも枝発生初期においては成長差がほとんどみられない。しかし、その後樹齢が進に従い徐々に成長差があらわれ、伸長開始時の開空度が高いシミュレーション個体ほど枝成長は低下する傾向にある。これは、枝の発生初期においては、それより上部に存在する枝はほとんどないが、個体の成長にともない初期に発生した枝は、上部樹冠の発達による庇陰の影響を受け徐々に受光量が減少し、その時伸長初期の開空度の高い個体（いわゆる陽樹）ほどその影響を強く受け、結果として枝成長が低下することを示すものと推察される。これらの結果から、本モデルは樹種と受光量に対応した成長モデルとして応用できることがわかった。いま、ホオノキの樹冠形状をよく表現しているパラメータとしては0.30付近が最も妥当な数値といえる。

なお、幹の最大伸長量については次式で表されるホオノキの供試木から推定した樹高成長曲線から得られる値を用いた。

$$H=A \{1-e^{-rt}\}^{1/(1-m)} \quad (15)$$

ただし、 H は樹高 (cm), t は樹齢 (年), $A=2240.25$, $r=0.0378$, $m=0.2349$ である。

4) 直径成長のシミュレーションモデル

リアルな樹形表示のためには、枝の長さや数に見合ったバランスのとれた枝や幹の太さが必要となる。直径成長に関する研究はこれまで数多く行われているが、その大部分は胸高位置における直径と樹高に関するものである。しかし、コンピュータグラフィックスにより樹幹の形成過程（直径成長）のシミュレーション表示を行うためには、任意の位置における直径成長のモデル化が必要となる。枝や幹等の直径成長は連年の断面積成長の積み重ねであり、任意の位置における断面積成長量は枝葉部における同化産物が幹へ垂直的に配分された結果である。したがってその高さより上方にある葉量に比例することはこれまでに、Shinozakiら (1964), 齊藤ら (1968), 猪瀬 (1976) により確かめられている。しかし、実際には葉齢による光合成能の違いや枝当りの着葉量等の推定が必要であり、葉量をもとにしての直径シミュレーションは実行上困難といえる。これまで、阿部 (1976), 猪瀬 (1982) は樹冠部の成長量を葉量におきかえ、樹冠長や表面積との関係から直径成長シミュレーションを行った。これらは、直径成長のシミュレーションとして有効な手法といえるが、コンピュータグラフィックス表示の際に必要な枝部の直径成長や枝の数に対応した幹の太さを表示するためのモデルとしては十分とはいえない。そこで、本研究ではこれまでの報告例や供試木の解析データをもとに、次のような直径成長モデルを検討した。まず、任意の位置における枝および幹の直径成長量は、それより上部の積算葉量に比例する (Shinozakiほか 1964) ことから、1年生枝の枝伸長量に対応する当年葉量との関係を解析し、コンピュータグラフィックスのための直径成長モデルを開発した。その際、枝および幹部の直径成長は断面積成長におきかえた。1年生枝の伸長量もここでは枝の基部断面積成長量におきかえて葉量との関係を見ることとした。

調査解析木のデータから、枝あるいは幹部にお

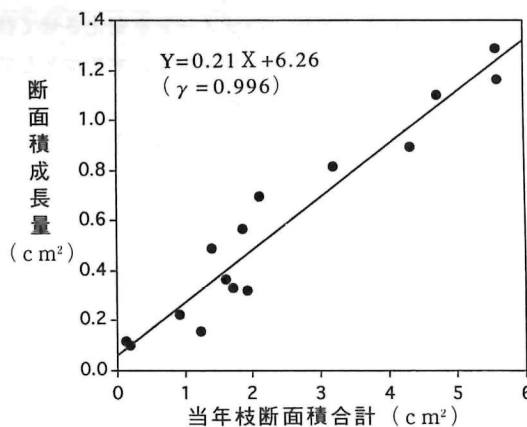


図-19 ホオノキの当年枝の断面積と断面積成長量との関係

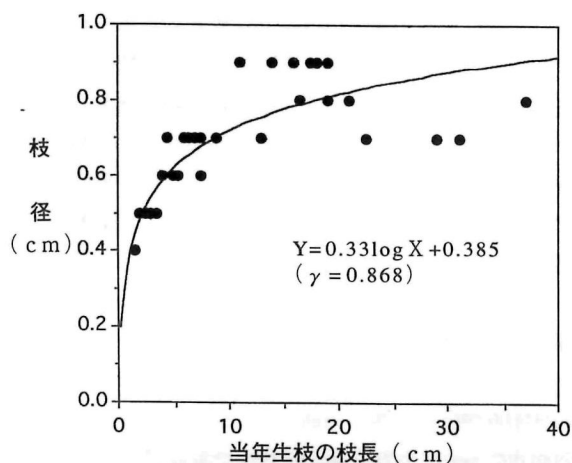


図-20 ホオノキ当年生枝における枝長と枝径との関係

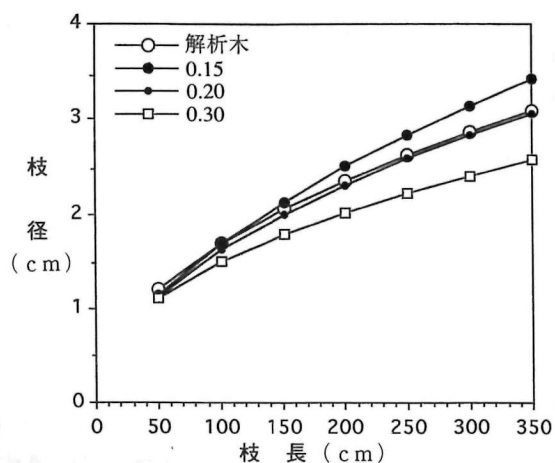


図-21 ホオノキの直径成長シミュレーション

ける年断面積成長量とそれより上方にある1年生枝の総断面積の関係を図-19に示した。図から、枝あるいは幹部の断面積成長量はそれより上部にある1年生枝の積算断面積と比例関係にあることがわかった。すなわち、当年の断面積成長量はそれより上部の1年生枝基部断面積積算値に断面積配分率(比例定数)を乗じることにより算出され、任意の位置の直径を次式によって求めることができる。

$$D = \sqrt{(G + \Delta G) \cdot 4 / \pi} \quad (16)$$

$$\Delta G = \alpha_3 \cdot \sum b l_{1b}$$

ただし、 D は任意の位置の直径(cm)、 G は前年度の断面積(cm^2)、 ΔG は当年の断面積成長量(cm^2)、 $b l_{1b}$ (cm^2)1年生枝の枝断面積、 α_3 はパラメータである。

なお、1年生枝の根元の直径については供試木の解析データから図-20に示すように相対成長関係が認められ、枝の伸長量から根元径が求められる。すなわち任意の位置の枝および幹の直径成長量はそれより上部(先端側)の1年生枝の成長量から算出することができる。図-21はこの成長モデルを用いて枝の直径成長をシミュレーションし、ホオノキ供試木から得られた枝直径成長曲線と比較したものである。図で示されるように、パラメータを変化させて枝の直径成長をみると、解析木とよく一致することからこのモデルは直径シミュレーションモデルとしてはほぼ満足するものといえる。

5) 枝の枯上がりと消失モデル

成長ともなう形状変化や樹種の特徴を表現するうえで、受光量の不足による枯れ枝の表示や落枝のモデルが重要となる。枝の枯死はさまざまな原因が考えられるが、本モデルでは受光量の不足に起因するものとして枝の枯上がりモデルを検討した。受光量不足による枝の枯死を表現するには、まず葉の受ける受光量を求め、これをあらかじめ設定されたしきい値(枯死しきい値)と比較することによりその枝の枯死、生存を決定する必要がある。樹木は光合成による物質生産と、呼吸によるエネルギー消費のふたつの生理活動を有し、それらのバランス関係により成長と枯死が生じると考えられている(藤森1971)。本モデルでは任意の枝における生産量を葉量として、また消費量を非同化部分の呼吸量としてとらえ、葉量は1年生枝の断面積に、呼吸量は枝表面積に比例するものと仮定した。すなわち、任意の枝より上位にある1年生枝の断面積合計がその枝の表面積(消費)小さい場合には、その枝は枯れるも

のとしてモデル化を行った。そこで、ホオノキの解析木のデータをもとに、任意の枝における枝の表面積とその枝にある1年生枝の断面積合計を求め図-22に示した。その結果図に示すように両者に密接な関係が認められた。この結果をもとに葉量（生産量）と呼吸量（消費量）の関係式を推定し、受光量不足にともなう枝枯れを次のようにモデル化した。つまり、枝の先端から幹方向に、枝表面積と1年生枝断面積のシミュレーションを順次行い、その値が図-22の回帰式から求められる値よりも小さい場合には、それより上部の枝は枯死（画像上から消去）するものとして、枝の枯損と消失を定義づけした。このモデルにより、成長にともなう樹冠部の自然な枝密度を表示することが可能になった。なお、生産量と消費量の関係は樹種によって異なることが考えられ、その勾配をパラメータで与えることとした。

5 単木形状の画像生成

1) 成長シミュレーション表示の手順

ホオノキの成長は、春期における1次成長において輪生状の葉を展開し、次に側生葉を展開しながら2次成長を行う（斎藤・菊澤 1978）。本モデルにおいても図-23に示すように、実際の成長様式に対応させて分枝モデルを作成した。まずそれぞれの茎頂部位において、幹や枝の主軸方向の成長および側枝の発生と成長、葉の発生と成長を計算する。その後、それぞれの成長点の開空度を計算し、受光量に応じて成長量や、葉の大きさや枚数等を求めるとともに、次期の成長方向を計算し、最後に枯死の判定を行う。なお、成長シミュレーションに要する計算時間は、枝や葉の数等で大きく変動するが、成長計算後の受光量計算と成長方向の計算が大部分を占める。作成した形状モデルは、コンピュータグラフィックス画像でシミュレーションを行い、樹形に関与すると考えられる形状因子を推定し、さらに様々な形状因子の組合せから樹形生成のための適正なパラメータを抽出し、モデル化した。なお、成長シミュレーション及び結果のコ

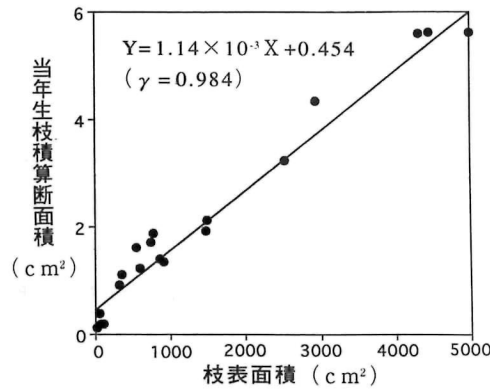


図-22 ホオノキにおける枝表面積と当年生枝積算断面積との関係

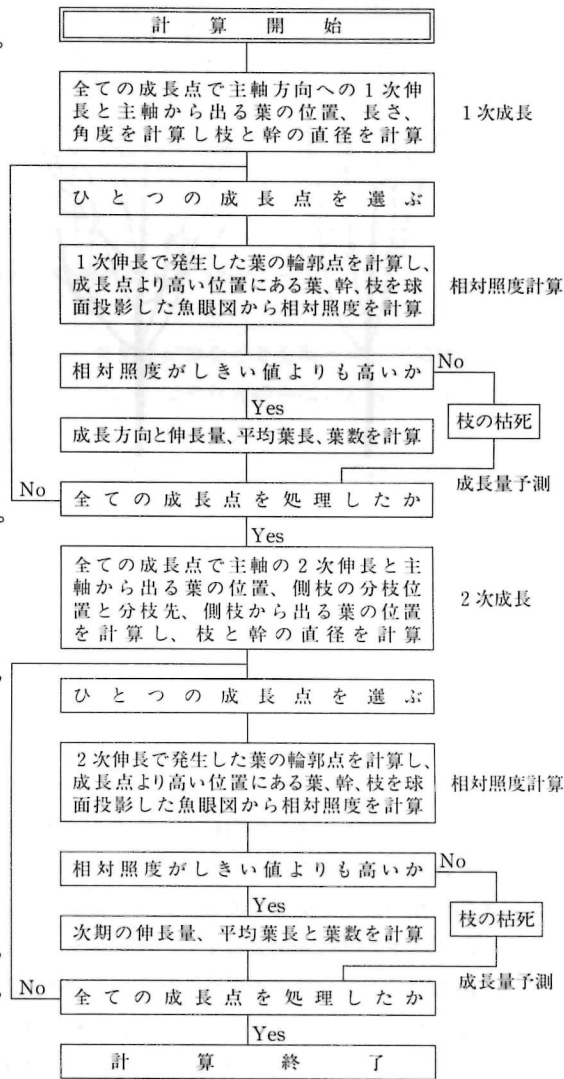


図-23 ホオノキ成長シミュレーションの表示手順

ンピュータグラフィックス表示のプログラムは、ワークステーション上のC言語で作成し、実行した。

2) 生成樹形とその評価

基本的な骨格形状を表示するモデルと成長モデルの組合せによりある程度の樹形表示は可能である。しかしながら、自然的かつ樹種特性の表現可能な樹形生成モデルを構築するには形状モデルと成長モデルのパラメータの組合せから得られるさまざまな樹形について視覚的評価に基づく樹種表現に必要なモデルと適正なパラメータの選択を行いながらモデルを作成する必要がある。前章で述べた各種のパラメータを変化させることにより、さまざまな樹形が得られる。図-24は、より明るい方向を求めて枝を旋

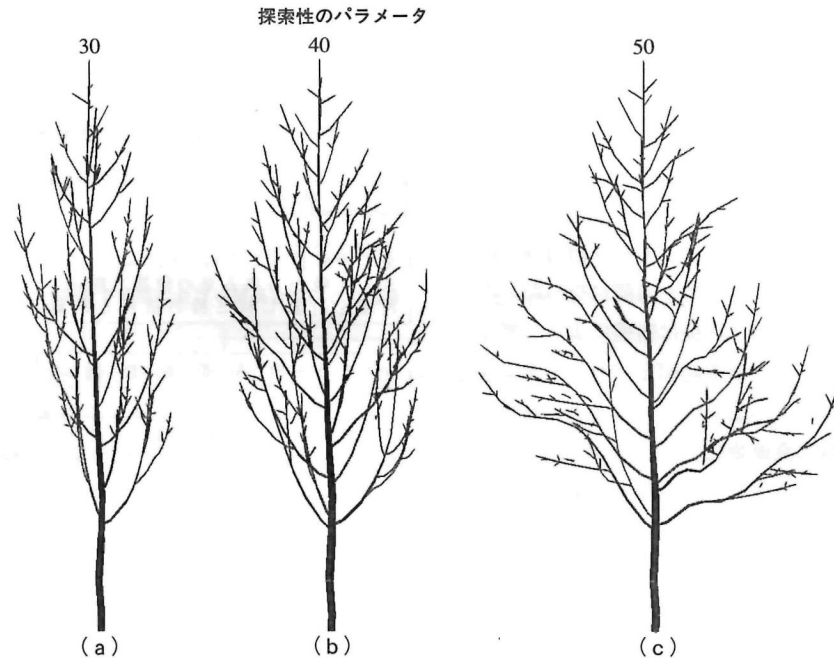


図-24 探索性による枝振りのシミュレーション

回することができる角度すなわち探索性の自由度を変えて単木形状を成長シミュレーションしたものであり、(a), (b), (c)と順に探索性の自由度を大きくしてシミュレーション表示したものである。それぞれの樹冠形状を比較すると、(a)で樹冠が狭く、(b)および(c)では樹冠全体の形状が広がり、枝が乱雑に成長する印象の樹形が表現される。また、探索度のパラメータが小さいものほど上方の枝葉のために生ずる自己庇陰を回避するための角度に制約があることから、受光量の不足により生き残る枝の数が少ない様子が確認され、パラメータによって単に枝振りが変わるといよりも、全く異なった印象を持つ樹形が表現される。実際のホオノキの樹形と比較すると通常は(c)のように枝は乱雑には広がらず、(a)および(b)の樹形がそれらしい印象を持つ樹形といえる。このように、特にホオノキにおいては枝の乱雑さを抑えるための探索性の設定が樹形生成に必要な樹種といえる。したがって本モデルにおいては 30° から 40° あたりがホオノキの枝振りを表現するパラメータとしては適正な値といえよう。

また、図-25は、受光量のモデル化に用いた枝の成長を開始する最小受光量である開空度のパラメータを変えてそれぞれシミュレーションして得られた樹形画像である。(a), (b), (c)をそれぞれ比較すると樹冠部の枝密度に明らかな違いが認められる。伸長を開始するための受光量を多く必要とする図-25(a)のシミュレーション画像は、受光量の少ない樹冠内部は枝の伸長と分枝が少ないことから、樹冠全体の

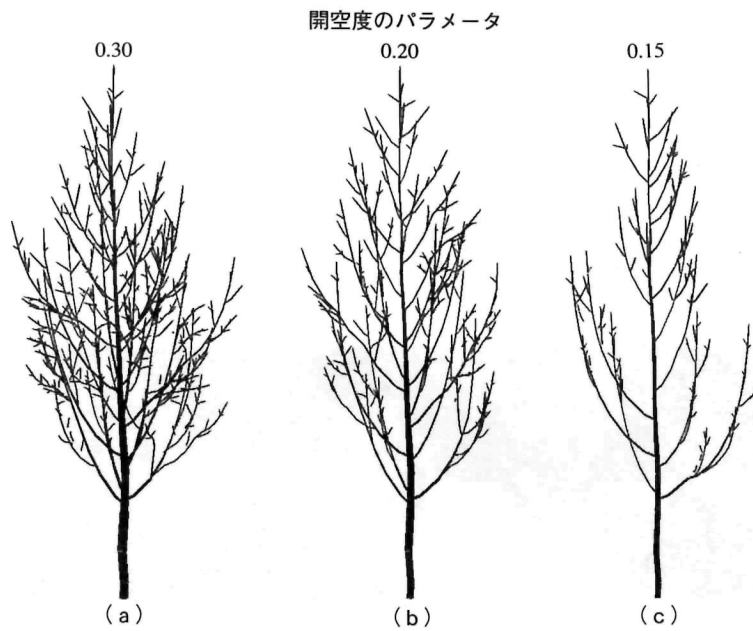


図-25 成長開始時のパラメータと枝振りのシミュレーション

枝密度も疎となる。一方、パラメータの値を小さくし、受光量が少なくても枝の伸長が可能のように設定して得られた(c)の画像は枝の枯死が少なく枝も密となり、(b)はそれらの中間の形状を示す。また、枝および幹の直径成長についても、1年生枝の枝密度に比例した直径成長のシミュレーションがモデル化されており、枝密度に対応した枝および幹の太さが表現されていることが表示画像から確認される。基本的な骨格形状に加え、図に示す画像をもとにした総合的な評価から樹形表示のための成長モデルと樹種表現に必要なパラメータの抽出を行いながら、樹形生成モデルの検討をすすめた。ホオノキの樹形を表現する受光量のパラメータとしては得られた画像から判断して、0.20付近が妥当な値といえよう。これらの画像は実際の樹形をよく表現していると考えられ、本モデルを用いることにより自然な枝振りをもつ樹形と樹種固有の樹形を画像生成することが可能ことがわかった。

3) 単木形状の成長シミュレーション

景観を考慮した施業計画においては、樹木や樹林の成長にともなう景観の動態を空間的・時間的に予測し、デザインすることが期待されている。樹木の成長を時系列的に表示できれば目的とする景観の動態を画像で予測することが可能になり、視覚的評価に基づく景観計画の立案が容易になる。そこで、表-4に示した基本的な形状モデルと成長モデルにおける各種のパラメータを時間(樹齢)により変化させてシミュレーションし、画像を生成したのが図-26である。また、葉も同時に表示したのが図-27である。表示個体は、樹高成長については時間(樹齢)の関数により、また枝および幹の成長は、各茎頂部位において全天空シミュレーションを行い、受光量の計算、受光条件に対応した枝の伸長方向、成長量、枝あたりの葉数、個葉形態、着葉位置、さらには枝の枯死や肥大成長等について与えられたパラメータを判定基準とした自己判断を行いつつ成長をつづける。

図示した単木の成長モデルのうち、おもな形状要素の計算式とパラメータ例を以下に示す。なお、(1)

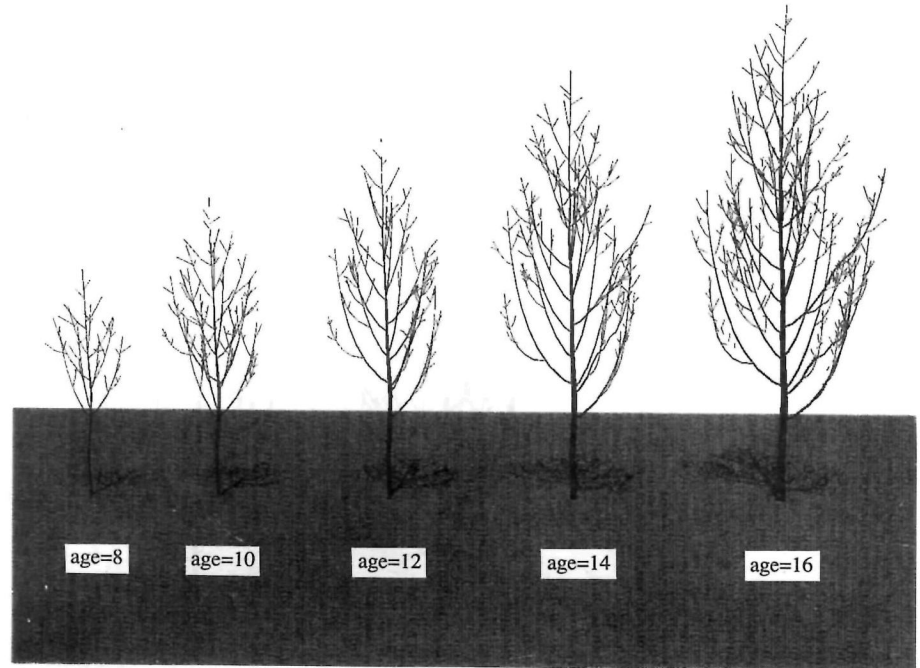


図-26 ホオノキ単木の成長シミュレーション（骨格形状の表示）

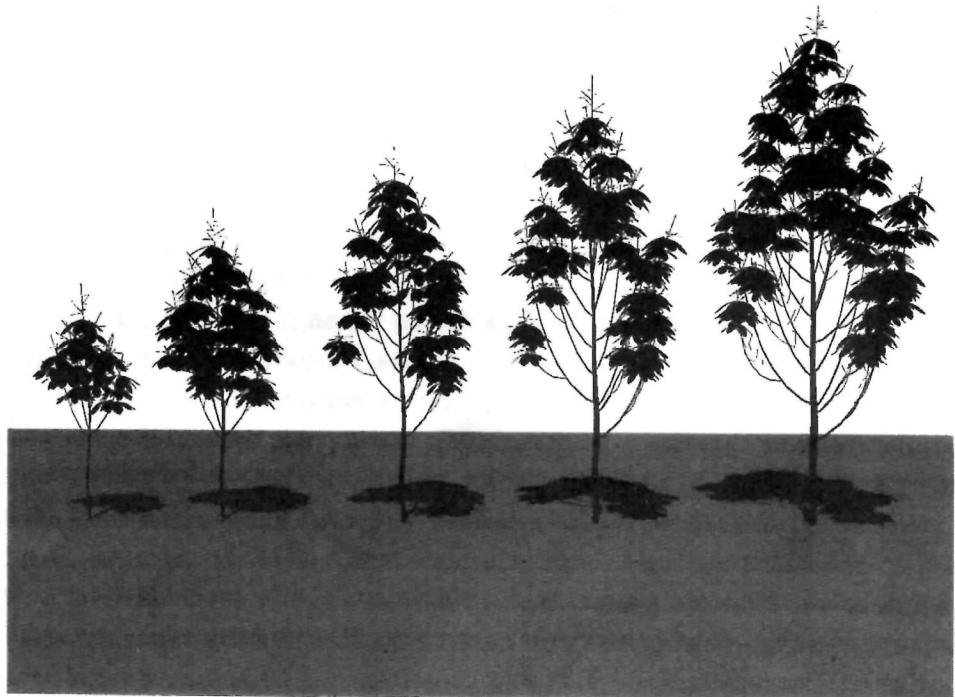


図-27 ホオノキ単木の成長シミュレーション（着葉画像表示）

~(21)は受光量に対応した枝の成長と消失に関するもの、(22)~(25)は葉の形状に関するものである。

$$\text{枝伸長量 (cm)} = A \{ 1 - e^{-K(I-L)} \}$$

ただし、 A は最大伸長量 (cm), K, I_0 はパラメータ, ここでは $A=60.0, k=6.0, I_0=0.20$ である。

$$\text{任意の位置の直径 (cm)} = (G + \Delta G) \cdot 4 / \pi \quad (18)$$

ただし、 G は前年度の断面積 (cm^2), ΔG は当年の断面積成長量 (cm^2) である。なお、

$$\Delta G = a_3 \sum b l_b \quad (19)$$

a_3 パラメータ, $b l_b$ は1年生枝の断面積 (cm^2), $a_3 = 0.21$ である。

$$\text{1年生枝の根元直径 (cm)} = a_4 \cdot L^b \quad (20)$$

ただし、 L は1年生枝の伸長量 (cm), a_4, b はパラメータ, ここで、 $a_4=0.362, b=0.306$ である。

$$\text{枯死しきい値 } (\sum b l_b) < a_5 \cdot b l_s + b_5 \quad (21)$$

ただし、 a_5, b_5 はパラメータ, $b l_s$ は枝表面積 (cm^2), ここで、 $a_5=0.002, b_5=0.454$ である。

$$\text{枝当たり葉面積 (cm}^2\text{)} = a_6 + b_6 \cdot \log L \quad (22)$$

ただし、 a_6, b_6 パラメータ, L は1年生枝の伸長量 (cm), ここで、 $a_6=1294.3, b_6=1997.0$ である。

$$\text{枝当たり葉数 (枚)} = a_7 + b_7 \cdot \log L \quad (23)$$

ただし、 a_7, b_7 はパラメータ, ここで、 $a_7=5.74, b_7=2.33$ である。

$$\text{葉の縦長 (cm)} = a_8 + b_8 \cdot L_a \quad (24)$$

ただし、 a_8, b_8 はパラメータ, L_a は1枚当たりの平均葉面積 (cm^2), $a_8=14.4, b_8=4.44$ である。

$$\text{葉の横長 (cm)} = a_9 + b_9 \cdot L_v \quad (25)$$

ただし、 a_9, b_9 はパラメータ, L_v は個葉の縦長 (cm) である。ここで、 $a_9=1.61, b_9=0.453$ である。

また、分枝の発生数は主軸の伸長が20cm以上から発生し、30cmで2本、40cmで3本、50cm以上で4本とするものとした。その際の発生角度は 45.0° 、標準偏差15.0とし、一様乱数を用いて発生させ、枝の探索性のパラメータとしては 30° を用いた。

4) 競合成長シミュレーション

本研究でこれまで提示した成長モデルは、単木個体の茎頂部における光環境について枝先の成長点を中心とした葉や枝および幹等の遮光体を球面投影した全天空映像を想定してのシミュレーションモデルである。受光モデルは遮光体を距離に対応して球面投影する手法であることから、単木における自己庇陰的影響もさることながら隣接木による光環境の影響、つまり他の個体（隣接木）との相互干渉的成長である競合成長シミュレーションへの展開も可能である。そこで、今回のモデルを用いて、他個体の影響を相互に受けながら成長する個体群、つまり個体間の競争を含めた樹林景観のシミュレーションを行い、画像表示したのが図-28である。なお得られた画像は、個体間の距離を2mに、パラメータを同一

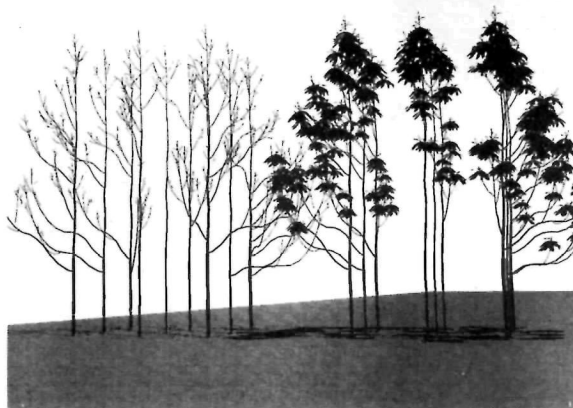


図-28 競合成長シミュレーション

条件のもとに、各個体について14世代（樹齢14年）の成長シミュレーションを行った。得られた画像からさらに、個体の中から上方および周辺から十分光を受けて成長した個体（いわゆる林縁木）と樹林内部で成長し、光の多くは上方からだけで成長した2つの樹形が得られた。林縁の個体は枝の枯上がりが多く、樹冠も大きい。これに対し受光条件が悪い林内も個体は枝の枯上がりが多く樹冠も小さい。このように、本モデルは成長過程における相互影響の結果による枝の枯上がりや樹冠の被圧等光条件に対応した樹形表現も可能である。

第3章 景観施業への展開

1 はじめに

コンピュータグラフィックスによる景観シミュレーションは、数値情報の可視化であり、データの作成範囲内であれば、あらゆる視点からの景観を時間の関数として表現可能であり、理論的な景観状況の分析を行うにあたっては極めて合理的かつ汎用性の高い手法といえる。また、視覚的評価が重要となる森林の景観施業や都市および住環境における緑のデザインづくりへの応用が期待できる。特に、森林の施業計画におけるコンピュータグラフィックスの利用を考慮すると、現実景観の表示を含め、経年的な景観変化に対応できる表示モデルが重要となる。たとえば、現実林分を景観シミュレーションし、将来の林分景観を画像上で示すことができれば、視覚的評価に基づく景観計画等を立案する上で有効な手法となる。従来の林分構造の予測では数値のみで表示されていたが、コンピュータグラフィックスによるシミュレーション技法を活用することにより、新しい手法としての景観計画へと発展させることができる。ここでは、これまで述べてきた樹形生成技術を活用しての森林景観の表示、施業計画への展開や民有林施業への指導、普及への利用、さらに樹木が重要な構成要素である都市や住環境における植栽計画や自然景観のシミュレーション等にどう利用できるか具体的適用を試みた。

2 森林景観の生成手法

施業計画の可視化をすすめるうえで、一定の広がりをもつ森林景観の立体的、経時的推移の画像表示が不可欠である。森林はさまざまな形状を有する樹木の集合体であり、それらは時間（樹齢）にしたがって変化する。したがって、より自然的な森林景観を表示するためには、同一林分にさまざまな樹形を生成し、それらを集合させて画像生成する手法の開発が必要である。そこで、本節では、これまで述べた樹形生成モデルをもとに現実林分の測定値から個体に対応した成長モデルのパラメータの推定を行った。そして、それらを集合して人工林および天然林の景観表示を試み、その景観の妥当性について検討することとした。

1) 人工林の景観表示

人工林の景観シミュレーションとして、植栽時から施業経過が明らかなトドマツ人工林として、胆振支庁管内壮瞥町にある35年生のトドマツ人工林を調査林分に選定した。同林分はこれまで大きな気象害や病虫害もなく、北海道における一般的な施業により育成されたトドマツ人工林である。この林分を対象に0.1 haの調査区を選定し、立木位置、樹高、枝下高、胸高直径、投影樹冠径を単木ごとに測定した。林分概況としてはha 当り立木本数1,240本、平均直径23.0cm、平均樹高16.1m、平均枝下高9.6m、平均投影樹冠径7.3mである。なお、この林分の施業経過は、ha 当り2,500本植栽、林齢20年でha 当り500本の間伐、林齢30年でha 当り約250本の形質不良木の伐採を行い、現在に至っている。よりリアルな森林景観を画像表示するためには、樹高、胸高直径、枝下高、樹冠直径等一般的な形状データをもとに樹冠枝葉部の形状表現に必要なパラメータを推定する必要がある。そこで、トドマツ単木成長モデルのパラメータを次の方法により各個体ごとに推定し、現実林分および過去の林相について画像生成する



図-29 トドマツ人工林の景観表示(林齢35年)

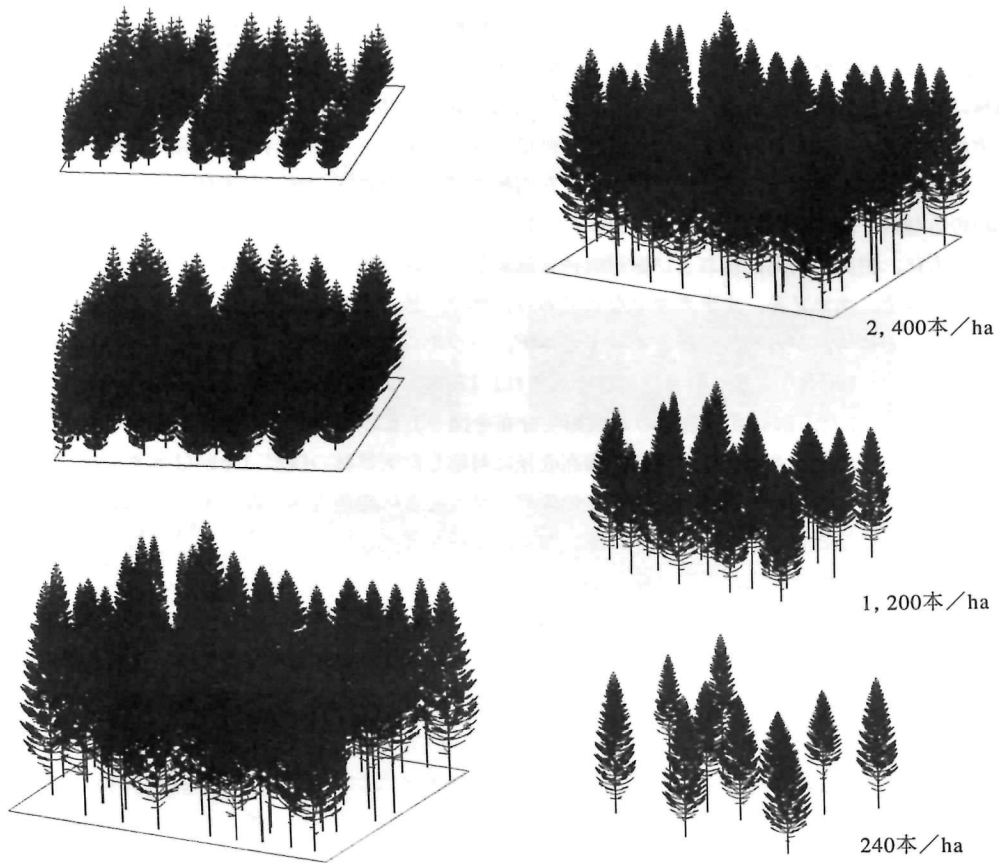


図-30 トドマツ人工林の成長シミュレーション

図-31 間伐林相のシミュレーション表示

を検討した。まず、林齢35年生時における各個体の到達樹高からそれぞれの個体ごとの樹高成長曲線式が推定される。次に、得られた樹高成長曲線式と枝下高および樹冠半径から、その時の1次枝の枝齢および枝長が推定され、各個体ごとの枝成長曲線が推定される。さらに2次枝、3次枝の枝寿命、枯れ枝の残存年数等のパラメータを個体ごとに推定する。こうして、単木ごとに成長モデルのパラメータを推定し、各個体の35年生の単木形状を生成し、得られた樹形を位置データをもとに集合して画像表示したのが図-29である。図はこれまで十分表わすことのできなかった樹冠細部の形状をよく表示し、また現在の林分状態もよく表現している。このように単木ごとの成長モデルを作成し、得られた樹形を集合して画像表示することは、より自然らしい森林景観の表現が可能であることがわかった。また、本研究における成長モデルは、形状要素を時間（樹齢）の関数として作成していることから、任意の樹齢における画像の生成が可能である。そこで、同林分における施業経過から立木本数、樹高成長、枝の発生や消長等のパラメータを個体ごとに推定し、過去の林相および現実林分の画像生成を行ったものが図-30である。図に示されるように、単木ごとのパラメータを推定することにより人工林の成長過程のシミュレーション表示を行うことができる。さらには、表示に必要な3次元データを個体ごとに保存しておくことができることから、図-31に示すように画像上での任意個体の消去や再表示、つまり間伐等施業前後の森林景観のシミュレーションが可能である。

2) 天然林の景観表示

天然林は、一般に多くの樹種と、多様な形状を有する個体の集合体であり、画像表示にあたっては、樹種と生育状況に応じた樹形の生成が必要である。樹種に対応した詳細な生成モデルは今後の研究課題とし、ここでは本研究で開発したホオノキの樹形モデルを用いて画像表示を試みた。そこで、実際の天然林における林分調査から得られた立木位置、樹冠配置、樹高、胸高直径等の形状データをもとに成長モデルのパラメータを各個体ごとに推定し、画像生成する手法を用いて自然的な森林景観の表示を行った。景観表示のための林分として、網走支庁管内興部町の広葉樹2次林を対象林とした。林内に30m×33mの方形区を設定し、プロット内に含まれる胸高直径4cm以上の全立木について立木位置図を作成するとともに、樹高、胸高直径および樹冠直径を測定した。調査地の樹種構成は、ミズナラ、ダケカンバ、イタヤカエデ、ホオノキ、ナナカマドなどである。林分の最大樹高は15.7mに達し、上層をミズナラとダケカンバの優勢木が占め、下層をイタヤカエデ、ハウチワカエデおよび他の樹種が占めている。林分概況としては、ha 当り立木本数と材積はそれぞれ1,170本および129.0m³、平均直径11.3cm、平均樹高9.9mである。また、胸高直径階別の本数頻度分布を図-32に示した。この本数頻度分布情報から前述した人工林の生成手法と同様に、樹高、胸高直径に対応した天然林の樹形（今回はホオノキで代表させた）を単木ごとに作成し、得られた樹形を位置データをもとに画像表示したのが図-33中の上段左の画像である。図に示されるように、立木位置、樹高、直径など現実林分のデータを用いることにより自然的な森林景観の画像が得られることがわかった。

また、画像上で任意の個体を針葉樹に変換することが可能なことから、広葉樹と針葉樹の比率を段階的に変化させて表示することにより、図-33に示すように混交比率（材積混交比率）を変えた森林景観を表示することもできる。従来から林分構造の表示例の一つとして図-32に示す頻度分布図が用いられているが、これに加え、図-33に示す森林景観画像を提示することにより数値情報をシミュレーション画像として視覚的に理解できることから、森林の施業計画等を立案する上での有効な手法といえる。なお、針葉樹は、優占木を主体に一樣乱数を発生させて表示した。さらに、葉色および着葉状態を単木ごとに表示を変えて画像生成すると図-34に示したように、同一林分の季節的景観変化を表現することも可能である。なお、秋期の紅葉時の画像表示の際、各個体の葉色をダケカンバは黄色に、ミズナラは褐

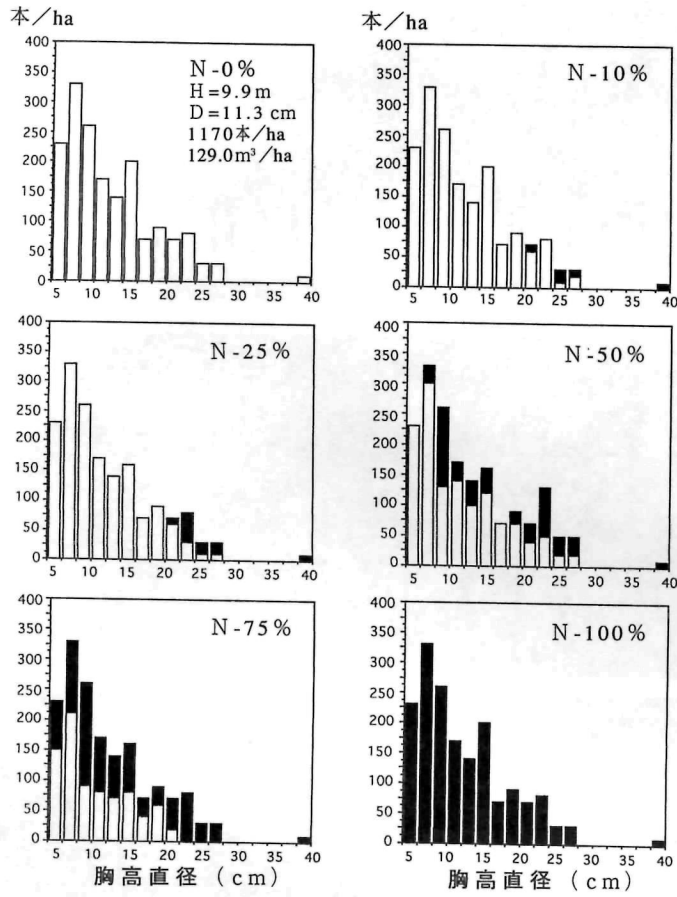


図-32 樹種別胸高直径階別本数分布

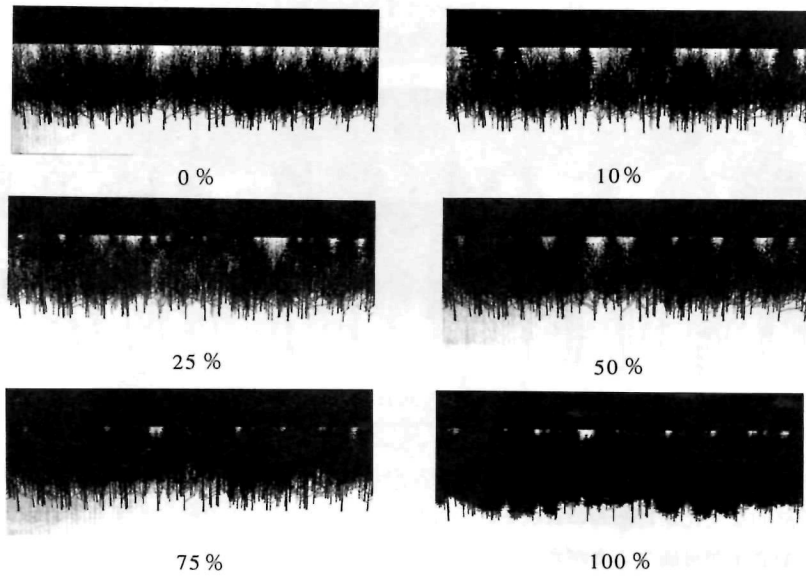
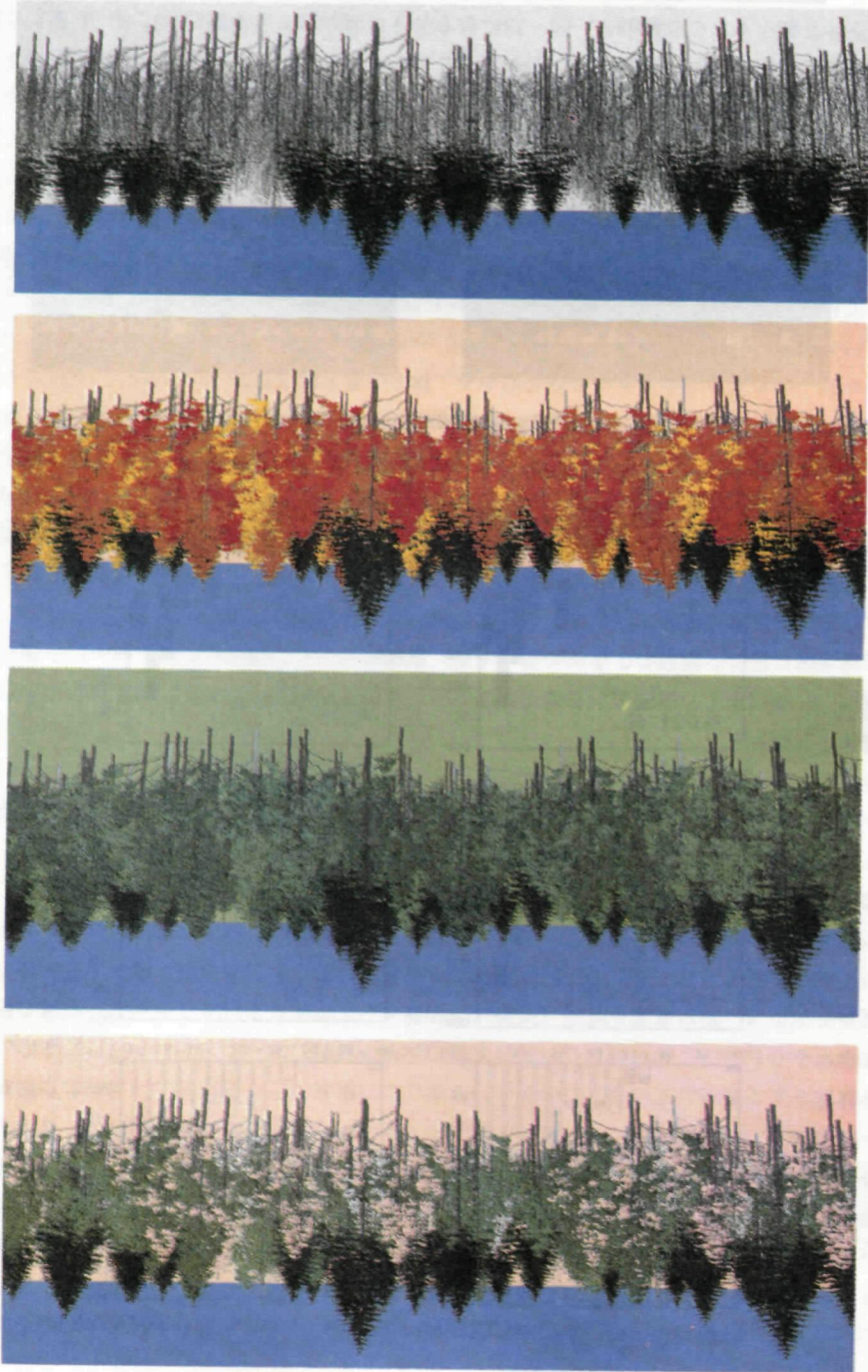


図-33 針広混交比率（材積比率）を変えた森林景観の表示

色に、イタヤ類は紅色に、それぞれの樹種に対応した葉色を用いて画像表示した。生成された画像は、森林景観の季節的な変化が自然的に表現されており、樹冠部の形状と色彩を変化させることにより林分の季節的な景観表示が可能となった。

このようにシミュレーション画像による森林景観の予測と評価により、森林景観施業での立木密度調

図-34 森林景観の季節変化の表示 (針葉樹材積比率25%)



整, 皆伐・択伐地区伐採計画の検討, 広葉樹の季節変化, 特に紅葉時の景観予測のためだけではなく植栽, 保存木選定など景観デザインの検討などにこのシステムを応用できる。また, 森林簿データの樹種, 立木密度, 林齢をもとにした景観予測も可能である。しかも, 任意の視点距離および視点角度からの森林景観のシミュレーションが可能であり, 森林構造と成長過程を時間的, 空間的に表示できることから視覚情報を必要とする伐採計画の樹立等, 今後の景観計画の新しい手法としても有用な手法の一つといえる。

3 施業計画の可視化

人工林の施業計画で最も重要なのが密度管理である。トドマツの間伐計画に対しては, 従来からトドマツ間伐指針表 (北海道 1988, 阿部 1989), あるいはトドマツ密度管理図 (真辺 1982), 各種の収穫表 (北海道 1976) が用いられてきた。また, これら表形式の収穫表から, 本数管理が選択できる密度管理, あるいは最近のパソコンを利用したシステム収穫表 (阿部・伊藤 1992) 等, さまざまな工夫がされてきた。しかし, 従来の方法は間伐の数値や目標とする径級が数値で示されているため, 間伐方法や間伐率による林分構造の差異等を直感的に理解するまでに至らなかった。本研究における成長モデルは, 前述したように形状要素を時間 (樹齢) の関数として作成していることから, 施業計画と施業にともなう林分構造の推移が視覚的にとらえることが可能であり, コンピュータグラフィックスを活用することにより新しい計画手法としてその発展が期待できる。そこで, これまで報告されている施業計画例をもとにその画像化を試みた。

1) 間伐指針のシミュレーション

人工林の施業計画として最も重要な作業の一つに地位に応じた間伐計画がある。ここでは, 阿部 (1989) のトドマツ人工林の地位別, 間伐方法別収穫予測表の諸数値をもとに, その画像化を実行した。間伐指針表は, 地位に対応しての中庸仕立, 密仕立, 特別密仕立の3通りの本数管理基準からなる。そこで地位と仕立密度の違いによる林分景観のシミュレーションを行った。間伐指針表から, 中庸仕立による35年生時の上層樹高, 平均樹高, 平均直径, ha 当たりの本数を表-5に示した。これらの数値情報から前述した森林景観の生成手法により単木ごとの成長モデルを作成し, 35年生の森林景観をシミュレーションし, 図-35の画像を得た。上層高は地位に応じ, それぞれ16, 14, 12mを表現しており, 地位のよい林分ほど樹高が高く, その分, 林相は混み合った状態をよく表現している。また, 地位のよい林分ほど樹高成長が早いので枝が枯上がり, 間伐遅れ林分の様相を呈している。従来はこうした状況はよく模式図として表現されてきた。しかし, コンピュータグラフィックスでは, 地位の違いによる枝の枯上がり等の差をリアルに表現することが可能であり, 間伐作業の重要

表-5 トドマツ人工林地位別林分構造 (林齢35年)

		I等地	II等地	III等地
上層高	(m)	16.0	14.0	12.0
平均樹高	(m)	14.1	12.3	10.3
平均直径	(cm)	22.5	18.8	14.7
ha 当たり本数 (本)		700	900	1,200
ha 当たり蓄積 (m ³)		212	171	123

阿部 (1989) から引用

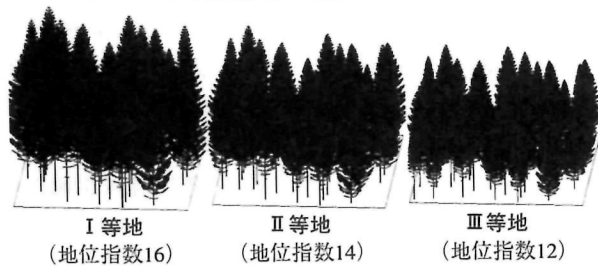


図-35 トドマツ地位別成長シミュレーション表示

性を視覚的に訴えることができる。

2) 施業体系の景観シミュレーション

従来、間伐指針ごとの施業体系は、施業目標としての最終収穫予想値に至る経過を模式化して図化しているがリアリティに欠けるきらいがあった。その点、先に示した間伐景観のシミュレーションを応用して、若い林齢から最終目標をコンピュータグラフィックスによって表現すれば、従来にない観点での施業指針を得ることができる。そこで、阿部（1989）の林分モデルにおける地位別、間伐方法別施業計画の画像化を試みた。このモデルは林齢に応じた本数、樹高、直径等の林分構造の推移を予測するもので、間伐基準は全層間伐とし、I等において中庸、密仕立の2つの密度管理による森林景観のシミュレーションを行った。各林齢における仕立方法別の林分構造は表-6に示したように算出される。

表-6 トドマツ人工林間伐方法別林分構造の推移（I等地）

間伐方法		中庸仕立林分				密仕立林分			
林分構造		平均		ha 当り		平均		ha 当り	
林 齢	上層高	樹 高	胸 径	本 数	材 積	樹 高	胸 径	本数	材積
17年	8 m	7.0m	8.5cm	2,100本	54cm ³	6.4m	7.5cm	2,700本	53cm ³
21	10	9.1	11.4	1,700	96	8.2	9.8	2,300	92
25	12	10.4	14.8	1,200	121	9.9	12.5	1,700	126
30	14	12.3	19.1	900	169	11.7	16.7	1,300	189
35	16	14.1	22.5	700	212	13.6	20.6	1,000	247
40	18	16.1	25.6	550	235	15.6	24.1	790	299
50	20	18.4	29.0	450	272	18.1	27.6	640	361
60	22	20.2	31.3	380	301	20.1	30.4	540	403
70	24	21.6	32.5	320	291	21.0	32.2	450	415
80	25	22.5	33.3	270	268	21.8	33.0	390	407

阿部（1989）から引用

これまでの手法と同様に、樹冠部の形状は樹高および立木密度等をもとに個体ごとの成長モデルを作成し、画像表示した。間伐木の選木は、一様乱数で発生させてランダムに実行した。図-36はI等地B（地位指数16）中庸仕立林分間伐指針をもとに、また図-37は同地位における密仕立林分間伐指針をもとに35年を経過した林相ををシミュレーションしたものである。なお、図は単木の形状判別を考慮し、5m×20mのベルトランセクトを想定して画像表示した。その結果、植栽後まもない幼齢時から最終目標に至る経緯および最終目標に近い林型をリアルな画像で描くことができ、森林の施業計画とその効果を視覚的に理解する上で有効と考えられた。すなわち、従来の収穫予想表は、各林齢時の林分構造を数値で示すものであるが、これに加えて間伐方法や間伐率による林分構造の推移が視覚的に理解されるならば、一般民有林等における経営指針の普及により効果的に活用することが期待できよう。また、これまでの施業指針と画像表示を併用することにより、新しい施業技術が展開することも期待できよう。

4 緑景観計画への応用

コンピュータグラフィックスはパース図と比較して写実性が高く、都市計画や建築計画等のプレゼンテーションとしての有効な手法の一つになっている。特に、建築物を背景にしての樹木や樹木の成長にともなう景観の動態が画像上で経時的、空間的に表現できれば、景観にマッチした樹木の配置とその評

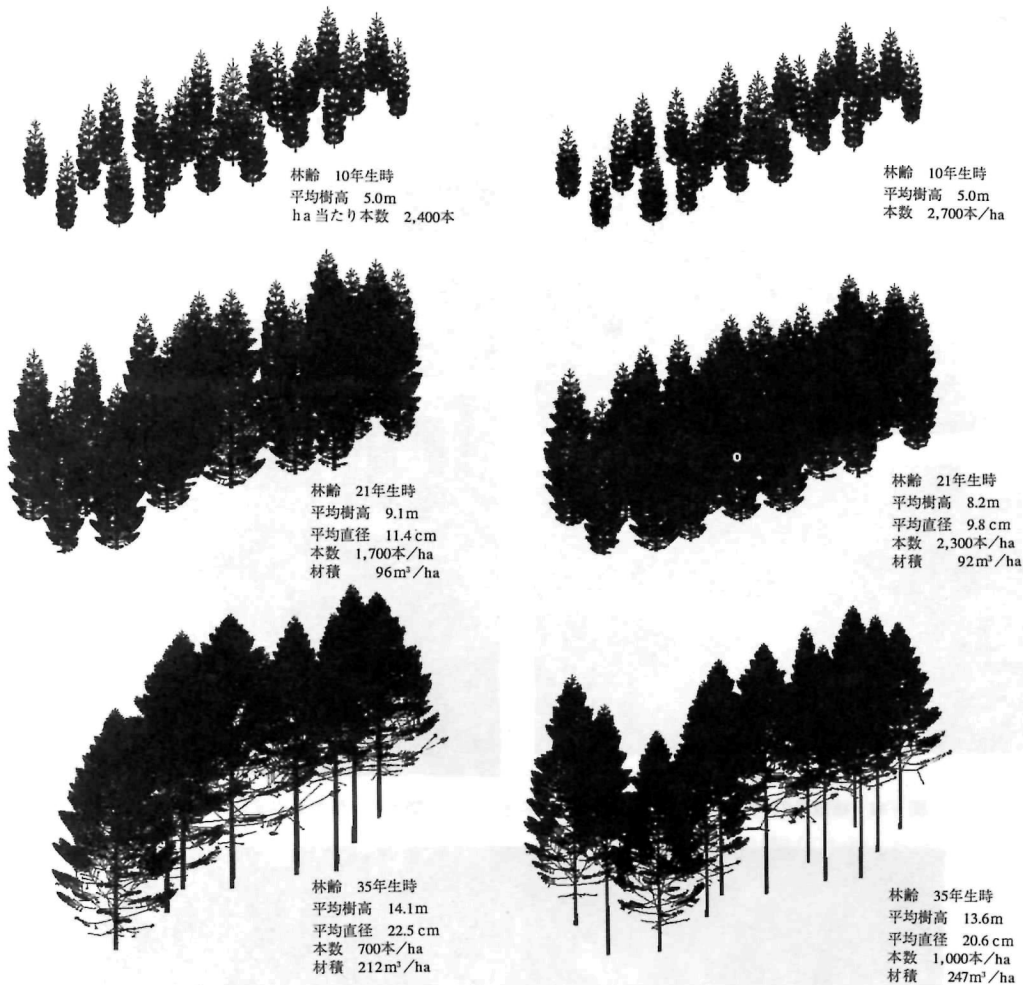


図-36 トドマツ人工林仕立方法別施業体系図のシミュレーション表示（中庸仕立て）

図-37 トドマツ人工林仕立方法別施業体系図のシミュレーション表示（密仕立て）

価，成長シミュレーションに基づく樹形誘導等緑の空間創出をすすめる上で有効な手法となる（斎藤ら・熊谷 1988）。

1) 植栽景観のシミュレーション

景観シミュレーションにおける樹木の表示方法としては，成長シミュレーションにより樹種や樹齢，生育環境等に対応した樹木を画像生成を行い，それらの形状データファイルをライブラリ化することにより目的とする条件に応じた樹木データを汎用的に利用し，表示する手法がある（日本図学会 1989）。

図-38は，トドマツによる道路植栽を想定し，植栽後の成長経過を，経時的に表示したシミュレーション画像である。図は樹齢に対応した樹形を成長モデルによって生成し，画像表示したものである。図に示すように，植栽後の景観が画像上で予測できることから，樹種選択，植栽による景観向上効果，維持管理の将来予測等，緑化計画を立案する上での有効な手法となる。また，生成画像は3次元データを有することから，樹高成長，植栽密度，林帯幅等の樹形データと日照，空気力学的シミュレーションによる防風，防雪効果の定量的機能評価等への活用も期待できる。図-39は，街路における植栽景観のシ



[植栽時]



[5年経過]



[10年経過]



図-38 植栽後のシミュレーション表示例

図-39 植栽後の成長シミュレーション表示例



図-40 森林景観を背景にした橋梁景観シミュレーション

ミュレーション画像である。視点や樹種を変えた街並み景観を表示することが可能なことから、緑環境に配慮した街並み設計への展開が期待できる。なお、こうした樹木の3次元形状データのライブラリ化は今後の景観計画や造園設計等におけるCADとしてきわめて汎用性の高いシステムとなることが予測される(本條ほか 1992)。

2) 自然環境における建築景観シミュレーション

近年、自然環境における大型建造物の建設や地形改変等が盛んに行われ、そのため周囲の自然環境を考慮した景観設計が重要となり、景観アセスメントにおいてもコンピュータグラフィックスを用いての景観シミュレーションが不可欠になることが予想される。自然景観における地形改変のシミュレーションについては、変更部分の規模に応じたメッシュスケールで数値情報が整備されれば、改変対象となる部分の数値情報をもとに数値地形情報を変更後の値に変換するだけで地形改変状況を画像表示することができる(斎藤・熊谷 1990)。図-40は自然景観を背景にしての橋梁設計におけるシミュレーション画像である。地形改変のシミュレーションについては、変更部分の数値地形情報を変更後の値に変換するだけで地形改変状況を画像表示することができる。また、建造物についても形状が数値情報として正確に把握されており、現在のコンピュータグラフィックス表示技術においてはきわめて精密なシミュレーション画像を生成することができる。自然景観のシミュレーションにおいては、人工物と自然物の表示画像において、両者が同程度の描写精度によりバランスよく表現されたシミュレーション画像が必要である。本研究において得られた樹形は図に示されるように自然的な画像が得られることから、森林景観と調和した建造物や道路の設計等今後の景観シミュレーションへの発展に貢献するものと期待できる。

摘 要

本論文は、景観シミュレーション技術における基本的な研究課題である自然的かつ写実的な樹形生成手法と森林景観のシミュレーション技術を開発し、森林の景観施策および緑化計画の立案においてコンピュータグラフィックスを活用した視覚的評価に基づく新しい施策計画手法に発展させることを考案した。樹形生成のための成長モデルを開発するにあたり、幾何学的な樹冠形状を示す針葉樹と楕円形状的な樹冠を持つ広葉樹では成長特性や形状が大きく異なることから、針葉樹型と広葉樹型に対応した樹形生成モデルをそれぞれ構築した。成長モデルは、樹形に関与すると考えられる形状因子を推定してモデルの原型を作成し、シミュレーションで得られた樹形に対し視覚的な評価を基にモデルの改良を行うとともに、様々な形状因子の組み合わせから樹形生成のための適正なパラメータを抽出し、モデル化を行った。なお、成長シミュレーションおよび結果のコンピュータグラフィックス表示のプログラムはC言語で作成し、ワークステーションで実行した。

針葉樹型の樹形生成手法として、本道の代表的な針葉樹であるトドマツの事例からモデルを作成した。それには、これまでの報告例に実測による樹幹および枝形状の解析資料を補完データとし、景観シミュレーションのためのモデルを作成した。その際、針葉樹特有の枝の枯上がりや残枝等の樹冠形状と樹齢にともなう樹形の変化を、樹高および直径成長、枝の数と角度、枝寿命等の形状要素を時間(樹齢)の関数としてとらえる手法をモデルに導入し、成長過程のシミュレーション表示を行った。その結果、樹冠形状に関与する樹冠角度と枝垂れ角度のパラメータを組み合わせることによりモミ属タイプからトウヒ属タイプの針葉樹までさまざまな樹冠形状が表現できることを示した。また、枝の成長停止年数のパラメータの組み合わせにより枝の枯れ上がりの程度や樹冠部の疎密感などの樹勢表現が可能であることを示した。また、各種のパラメータを時間(樹齢)により変化させることにより時間の変化に対応した樹形、すなわち単木の成長過程のシミュレーションが可能であることがわかった。

一方、広葉樹型の樹形を表現するためには、分枝システムや成長パターン等の遺伝的に定まる形状形態に加え、光を求めて成長した軌跡のような枝振り、受光量に対応した伸長成長と肥大成長、さらには受光量の不足にともなう枝の枯死等、個体成長の過程で形成される獲得形状的な自然な枝振りをもつことが成長モデルに必要とされる。特に、枝の疎密度や光を求めて成長した様子等の自然な枝振りを表現するためには関数モデルによる樹形生成には限界があり、広葉樹の樹形表示モデルの作成には新たな開発が必要であった。そこで、本論文では、樹形生成に最も影響を与えると考えられる光環境の影響、すなわち上方の枝葉や隣接木等の存在による受光量の変化に対応した成長、消失等の成長モデルを検討した。その際、受光量のシミュレーションモデルとして茎頂部を投影の中心とした全天空画像を想定しての光環境のシミュレーションモデルを考案し、受光量に対応した枝の成長と消失モデル、さらには明かるい方向に向かう枝の探索性、直径成長のシミュレーションモデルをそれぞれ開発した。その結果、より明るい方向を求めて枝を旋回することができる角度、すなわち探索性の自由度のパラメータと成長開始時の明るさのパラメータの組合せによって樹冠部の枝葉密度の表示と枝の乱雑性の表現が実現され、自然的な枝振りの樹形表示が可能であることを示した。また、直径成長のシミュレーションのモデル化によって、枝密度に対応した枝および幹の太さが画像表現できることを示した。また、本モデルは成長過程における個体相互の影響による枝の枯れ上がりや樹幹の被圧等光条件に対応した樹形表現も可能であることを示した。得られた画像は、いずれも実際の樹形をよく表現していると考えられ、本モデルを用いることにより自然な枝振りをもつ樹形を画像生成することが可能なことがわかった。

コンピュータグラフィックスを活用しての施業計画をすすめるうえで、一定の広がりをもつ森林景観の立体的、時間的推移の画像化が不可欠である。そこで、本論文ではこれまで述べた樹形生成モデルをもとに現実林分の測定値から個体に対応した成長モデルのパラメータを推定し、それらを集合した人工林および天然林の景観表示を試み、その景観の妥当性を検討した。まず人工林の景観シミュレーションとして、個体ごとの形状パラメータから単木形状を生成し、得られた樹形を位置データをもとに集合して画像表示することにより、過去の林相および現実林分の画像生成を自然的に表現できることを示した。さらには、画像上の任意個体の消去や再表示つまり間伐景観シミュレーションについても画像として表示することが可能であることを示した。

天然林の景観表示としては、画像上で任意の個体を針葉樹に変換することが可能なことから、針葉樹と広葉樹の比率を段階的に変化させて表示することにより混交比率を変えた森林景観表示、さらには葉色や着葉状態を単木ごとに表示を変えて画像生成することにより森林の季節的な景観表示が可能であることを示した。施業計画の可視化の試みとして、トドマツ人工林の地位別仕立方法別施業体系のシミュレーション表示、街路における植栽景観、さらには自然環境を背景とした景観シミュレーションを行ったところ、いずれも自然的な画像が得られることを示した。

以上の結果から、これまで林分構造や樹木の情報は、立木位置、樹高、枝下高、胸高直径、樹冠直径等の数値情報によって示されていたが、コンピュータグラフィックス技術を用いることにより、樹種や成長にともなう景観変化等が画像上で時間的・空間的に予測することができ、施業体系図や密度管理図と併用することにより視覚情報を必要とする森林の景観施業の立案や開発の手段を見いだすための大きな手がかりを得ることができた。これらの成果は、今後のコンピュータグラフィックスを活用しての森林施業計画をはじめ都市や住空間の緑環境計画等さまざまな分野におけるシミュレーション研究をすすめる上で役立つものと考えられる。

文 献

- 阿部信行 1976 トドマツ人工林の施業法に関する研究(1)疎開木の相対生長. 北林試報 14:27-36
- 1989 トドマツ人工林間伐の体系化に関する基礎的研究. 北林試研 26:1-95
- 1992 トドマツ人工林のシステム収穫表における幹形表現. 日林北支論 40:173-175
- 伊藤寿勝 1992 トドマツ人工林のシステム収穫表. 光珠内季報 88:1-8
- 安藤 貴 1983 全天写真による林冠の開空度の測定. 林試研報 323:4-8
- 安居院猛・福田智美・中嶋正之 1991 景観表示のための樹木の生成方法. 情報学論文誌 32:618-625
- AONO, M. and KUNII, T. 1984 Botanical Tree Image Generation. IEEE Computer Graphics & Applications 4:10-34
- 千葉則茂 1989 樹木・草本の生成に関する研究動向. グラフィクスとCAD, 40:81-86
- 1990 樹木と岩. PIXEL, 93:115-120
- 大川俊一・村岡一信・三浦 守 1993 CGのための樹木の成長モデル—架空の「植物ホルモン」による自然な樹形の生成—. 信学論 J76-D-2 1722-1734
- CHIBA, N. OHKAWA, S. MURAOKA, K., 1993 Visual Simulation of Botanical Trees Based on Vertical Heliotropism and Dormancy Break. The journal of Visualization and Computer Animation 4
- FISHER, J. B. and Honda, H. 1979 Branch Geometry and Effective Leaf Area. A Study of Terminalia Branching Pattern 1 Theoretical Trees American J. Bot., 66:633-644
- GARDNER, G. Y. 1984 Simulation of Natural Scenes Using Textured Quadric Surfaces. Computer Graphics 18:11-20
- 畠山末吉 1981 トドマツ産地間変異の地域性に関する遺伝育種学的研究. 北林試報 19:39-69
- 菱沼勇之助 1986 立体林相図による森林の解析. 北大演研報, 43, 317-333
- 1992 a 三次元表示法による樹木の成長過程の解析(1) 樹幹形の表示の方法. 北大演研報 49(1):1-22
- 中田了五・深沢和三 1992 b 三次元表示法による樹木の成長過程の解析(2)—樹冠径に対応した容積密度と繊維走行の分布—. 北大演研報 49(1) 23-35
- 北海道 1976 北海道主要樹種—収穫表と成長量に関する資料 (I)—. 105 PP,北海道林業改良普及協会 札幌
- 1988 トドマツ人工林間伐の手引き. 103 PP,北海道林業改良普及協会 札幌
- 1992 間伐のすすめ. 2-3 北海道林業改良普及協会
- HONDA, H. 1971 Description of the Tree-like Body. Effects of the Branching Angle and the Branch Length on Shape of the Tree-like Body, J. Theor. Biol., 31 331-338
- 本多久夫 1978 a 樹木の幾何学模型. 数理科学 184 18-25
- 1978 b 樹木の三次元モデル. Sci. Form, 1:85-94
- 1981 樹木の分枝. 数理科学 221 78-85
- 本篠毅・斎藤馨・熊谷洋一 1992 植物形状モデリングとその可視化による景観予測に関する考察. 造園雑誌 55:301-306
- 猪瀬光雄 1982 単木間の競合関係にもとづくトドマツの成長モデル(1) 樹冠の発達と材積成長量. 林試研報 318:103-127
- 藤森隆郎 1971 わかりやすい林業研究解説シリーズ—枝打ちとその考え方—. 日本林業技術協会 東京

- 石井啓資・千葉茂則・斎藤伸自 1986 自然の画像生成—木の手続き的形狀定義法—, グラフィクスと CAD 21:5
- 石塚森吉・菅原セツ子・金沢洋一 1989 林内照度と広葉樹数種の伸長量, 日林北支論 36:48-50
- 出原栄一 1974 コンピュータによる樹木の成長シミュレーション, 数理科学 132:34-38
- 金丸直義・千葉茂則・斎藤伸自 1987 CGのための樹木の成長モデルについて, グラフィクスと CAD 19:27
- ・—————・————— 1988 CGのための樹木の生長モデル, 第4回 NICOGRAPH 30-38
- ・高橋清明・千葉茂則・斎藤伸自 1991 潜伏芽と力枝を考慮した樹木の生長モデル, 情処学研報 91:43-50:34
- 菊沢喜八郎 1983 北海道の広葉樹林, 北海道造林振興協会 152 PP. 札幌
- 小林正吾 1990 樹木のアロメトリーと樹形, 文部省研究成果報告 63560147 2-5
- KOJIMA, M. and WAGER, A. 1972 Computer-generated drawings of ground form and vegetation, J. of Forestry 71:282-285
- LINDENMAYER, A., 1968 Mathematical Models for cellular Interactions in Development, J. Theor. Biol., 18:280-299
- MANDELBROT, B., 1977 Fractals Form, Chance, and Dimension, W. H. Freeman and Company
- 真辺 昭 1982 トドマツ人工林の収穫量と収穫の予想システムに関する研究, 林試研報 31-7 1-65
- 水井憲雄・菊沢喜八郎・浅井達弘・清和研二 1990 トドマツ人工林の間伐試験 (2) 間伐7年後の葉量と葉齡構成, 北林試報 28:75-88
- 中嶋正之・福田智美・安居院猛 1988 景観表示のための樹木の生成方法, NICOGRAPH 論文コンテスト 4:22-29
- 中須賀常雄・春木雅寛・中尾考一・松田 彊 1972 トドマ単木の枝葉量について, 日林北支講 21:61-65
- 和 孝雄 1986 択伐作業の展開構造—下北地方国有林のヒバ林経営の分析—, 北大演研報 43:177-316
- 日本図学会 1989 CGハンドブック, 森北出版 516 pp. 東京
- 野堀嘉裕 1990 コンピュータグラフィックスによる森林構造の3次元表示, 日林誌 72:234-238
- 奥村昭雄・小川真樹 1986 光天球の中で生長する樹形 1, Science on Form, 2:59-88
- 大崎恵一・山本 寧・鈴木悌司・佐藤 創 1991 樹形モデルを用いた針葉樹の表現, グラフィクスと CAD 52(4):19-26
- ・—————・—————・————— 1992 景観表示のための針葉樹の生成手法, 北工試研報 291:1-7
- OPPENHEIMER, P. E. 1986 Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees, Computer Graphics 20:55-64
- PRUSINKIEWICZ, P. LINDENMAYER, A. and HANAN, J. 1988 Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes, Computer Graphics 22:146-160
- REFFYE, P. 1988 Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development, Computer Graphics 22:151-158
- , 1990 Basic Concepts of Computer Plant Growth Simulation, 第6回

NICO-GRAPH 219-234

- 齊藤秀樹・四手井綱英・菅 誠 1968 樹幹形についての考察. 2, 3の幹形の表し方および幹における同化物質の垂直配分についての考え方. 京大農演報 40 93-110
- 齋藤 馨・熊谷洋一 1988 カラーコンピュータグラフィックス(CGC)による景観予測手法の開発に関する研究. 造園雑誌: 51(5) 257-262
- 1990 カラーコンピュータグラフィックス(CGC)による森林景観情報処理手法の開発—空中写真画像と地形・植生数値情報の α 合成表示と3D表示—. 東大農学部演習林報告 83: 143-154
- 齋藤新一郎・菊沢喜八郎 1976 頂芽タイプと新条の伸長. 北方林業 28 242-244
- 佐藤大七郎・堤 利夫 1978 樹木—形態と機能—. 文永堂 320 pp. 東京
- SHINOZAKI, K., K. YODA, K. HOZUMI, and T. KIRA, 1964 A quantitative analysis of plant form the pipe model theory 1. Basic analysis. Jap. J. Ecol. 14 97-105
- 塩田敏志・小島通雅 1982 森林景観検討の一手法 —電卓システムによる朝日の森の景観予測—. 森林文化研究 3: 21-31
- 1983 環境情報処理と造園計画—景観デザインにおける電算機適用の展望—. 造園雑誌 46: 270-277
- SMITH A. R. 1984 Plants, Fractals and Formal Languages. Computer Graphics 18 1-10
- 鈴木悌司・大崎恵一 1991 コンピュータグラフィックスによるトドマツ単木形状の3次元表示. 第102回日本林学会講演要旨集 25
- ・—————・佐藤 創・山本 寧 1992 a コンピュータグラフィックスによるトドマツ単木の形状表示. 日林誌 74(6): 504-508
- ・—————・—————・————— 1992 b コンピュータグラフィックスによる広葉樹の樹形発達の3次元表示. 第103回日本林学会講演要旨集 28
- ・————— 1993 受光量を考慮した広葉樹の樹形生成モデル. 第104回日本林学会講演要旨集 60
- 1993 コンピュータグラフィックスを用いて針葉樹を描く. 光珠内季報 93: 14-16
- 玉井重信・四手井綱英 1972 林内の照度 2.—全天空写真による解析1—. 京大演報 44: 100-109
- 田中祐一 1944 樺太における原生林の本質と施業に関する研究 九大演研報 14: 1-142
- 早稲田収 1983 開空度の測定とその光環境示標としての応用 林試研報 323: 9-13