景観表示のための針葉樹の生成手法

大崎　恵一，山本　　寧
鈴木　悌司*，佐藤　　創*

Scenery Generation of Needle-Leaf-Trees

Keiichi OHSAKI, Yasushi YAMAMOTO
Teiji SUZUKI*, Hajime SATO*

抄　録

CG による自然景観のシミュレーションでは樹木の表現が重要であり，リアルな樹木を CG 表示するための形状モデルが期待されている。これらを考慮し，本道の代表的な樹種であるトドマツについて，これまでの報告や樹冠解析データを基にして樹形生成モデルを作成した。モデルの各種パラメータを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，様々な樹形を表現できること及び，間伐シミュレーションも行えることを確認した。

1．はじめに

CG による自然景観のシミュレーションでは樹木の表現が重要である。特に，庭園や公園，街路の並木などの種々の建築計画のための景観シミュレーションでは立体感のあるリアルな樹木の表現が期待され，関心がもたれている。

CG のための樹木の形状定義法はこれまでに多数報告されているが [(1)(2)]，こうした目的のためには手続き的に樹木の 3 次元形状データを生成する手続き的形状定義法が有効である。この方法は①視点などの位置を自由に設定できる，②風による樹木のゆらぎを表現できる，③多くの樹種や樹形が生成できるという利点がある。さらに，この手続の中に時間の要素を組み込むことにより，時間的な形状の変化，つまり，樹木の成長をシミュレーションすることが可能になる。

こうした手続き的形状定義法（以下「成長モデル」と記す。）もいくつか報告されているが，樹種の特徴を細部まで表現できる報告は例が少ない。そのため，樹木の形状や成長の専門的な知識に基づいた成長モデルの研究が期待されている。

こうした点を踏まえ，これまでの報告や樹冠解析データに基づいた針葉樹の成長モデルを開発したので以下に報告する。

2．研究方法

これまで報告されている針葉樹の成長モデルには樹齢の増加に伴う針葉樹の枝の垂れ具合いや枯れ枝の残枝などの樹種特性を十分に表現できるものはほとんど見られない。そこで，針葉樹独特の形状変化などの樹種特性を十分に表現できる成長モデルの作成を主眼に研究を行っ

*　北海道立林業試験場

た。針葉樹の対象樹種として本道の代表的な針葉樹であるトドマツを選定し，成長モデルの作成を行った。

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，成長シミュレーションで得られた樹形を，3 次元表示して視覚で評価しながらモデルを改良する方法で研究を進めた。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，モデル化を行った。

なお，成長シミュレーション及び結果の表示プログラムはC言語で作成し，ワークステーション上で実行した。

2.1　トドマツの形状定義

針葉樹の成長モデルは樹木を構成する幹や枝の発生と成長，樹齢増加に伴う形状の変化を定義できるように作る必要がある。ここではまず，針葉樹の樹種として選定したトドマツの形状定義について述べる。

トドマツの樹形を模式的にみると幹（主軸）と幹から発生する側生枝，さらに，側生枝は幹から輪生状に発生する 1 次枝，1 次枝から発生する 2 次枝，以下 3 次枝，4 次枝などの分枝階から構成される。

当年に伸長した幹と枝部を第 1 枝階, その時の側生枝を 1 年枝，前年に伸長した幹部を第 2 枝階, その時の側生枝を 2 年枝，以下, 順次樹齢に対応した枝階と枝齢が定義される。図 1 にトドマツの樹形の模式図を示す。

幹はほぼ直立し，幹の成長と同時に，枝の成長と分枝の発生が行われる。こうした幹と枝の成長と分枝の繰り返し，及び樹齢や枝齢の増加に伴う枝の枯れ上がりや枯れ枝の残枝により，トドマツ特有の樹冠形状が形成されていく。

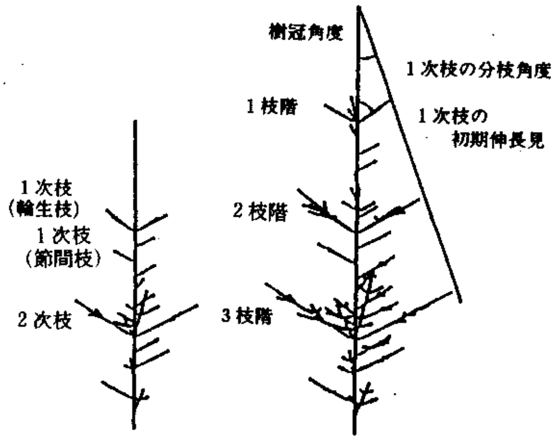

図1　トドマツの樹形の模式図

表1　トドマツの形状要素と成長に関与するパラメータ

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

トドマツの形状を表現するために，こうした樹形を支配する要素を樹齢や枝齢，年数などで定義する成長モデルを検討した。

すなわち，成長モデルでは発生に関しては発生場所と発生割合・発生方向を求め，成長に関しては長さ方向の伸長量と直径成長量，形状変化については枝垂れや枯れ上がり, 枝の消失などといった成長手続きの定義を行った。

トドマツの樹形生成のための成長モデルのパラメータを形状要素別にまとめたものを表 1 に, このうちの主なものを以下に示す。

2.2　トドマツの樹高の成長モデル

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，(1) で示されるトドマツの地位指数曲線式[3] から求められる当年の樹高（h_t）と前年の樹高（h_{t-1}）

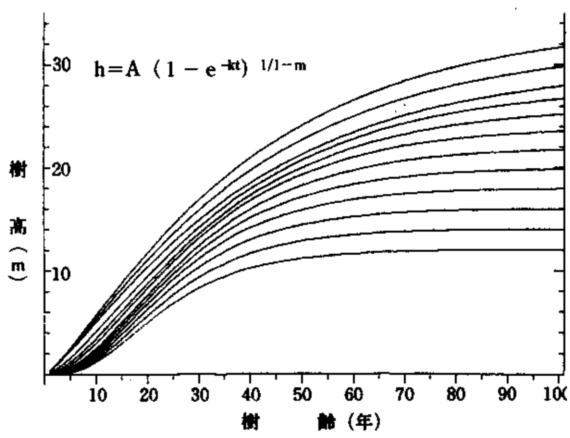

図2　トドマツの樹高成長曲線

との差として定義した。ここに，h_t は樹齢 t 年における樹高，A，k，m はパラメータ，t は樹齢である。

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

(1) 式のパラメータを変化させることにより，図 2 に示すような地位に応じたトドマツの樹高成長曲線が得られる。

2.3　トドマツの 1 次枝の成長モデル

①輪生枝の発生数

幹から輪生状に発生する 1 次枝の数はこれまでの報告によると産地により変異があり，その平均値は 4 本から 6 本の範囲にある [4]。そこで，枝の発生数は，平均値 5，標準偏差 1.02 の正規分布をすると仮定し枝階ごとに推定し，その整数値で表現した。

②第 1 枝階の分枝の発生角度

樹齢 t 年における第一枝階の分枝の発生角度（ϕ_t）は，樹齢に伴い増加するものとし，次式により定義した。ただし，ϕ_s は初期発生角，t は樹齢，α_2 はパラメータである。

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

③樹冠角度

樹冠角度を 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した。樹冠角度は樹齢に伴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。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。

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

④ 1 次枝の初期伸長量

樹齢 t 年における 1 次枝の初期伸長量（bl_s）は，主軸（幹）の連年成長量，樹冠角度および分枝角度から次式により求めた。ただし，Δh_t は樹齢 t 年における連年成長量，θ_t は樹齢 t 年における樹冠角度，ϕ_t は樹齢 t 年における分枝の発生角度である。

$$bl_s = \Delta h_t \cdot \mathrm{Sin}(\theta_t)/\sin(180 - \theta_t - \phi_t) \quad \cdots\cdots (4)$$

⑤ 1 次枝の 2 年目以降の連年伸長量

1 次枝の年伸長量は年々減少し，成長停止年数（枝の寿命）で年伸長量が 0 になるとし，各枝階の 1 次枝の 2 年目以降の連年伸長量（Δbl_t）は次式により求めた。

ただし，bl_s はその枝階の 1 次枝の初期伸長量，b_t は枝齢，l_n はその枝階の 1 次枝の成長停止年数である。

$$\Delta bl_t = bl_s \sqrt{1 - (b_t - 1)/(l_n - 1)} \quad \cdots\cdots (5)$$

⑥着枝角度の変化

n 枝階の 1 次枝の着枝角度（ϕ_{tn}）は，枝齢増加に伴い増加するとし，次式により求めた。ただし，ϕ_t は樹齢 t 年に発生した n 枝階の初期発生角度，α_6 はパラメータ，b_t は枝齢である。

$$\phi_{tn} = \phi_t + \alpha_6 \cdot b_t \quad \cdots\cdots (6)$$

⑦ 1 次枝の成長停止年数

力枝の位置が年々上昇して行くことから，1 次枝の成長停止年数は枝階の増加に伴い年々増加していくとし，n 枝階の 1 次枝の成長停止年数（l_n）は次式により定義した。ただし，t_s は n 枝階の成長停止年数初期値，t_n は 1 次枝の発生年次，α_7 はパラメータである。

$$l_n = t_s + \alpha_7 \cdot (t_n - 1) \quad \cdots\cdots (7)$$

⑧枯れ枝の着枝年数

枯れ枝の着枝年数は，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。

2.4　トドマツの 2 次枝以下の各分枝階の成長モデル

①発生率と伸長量

分枝の発生は，解析木の調査データから上位分枝階の伸長量が 7cm 以上の場合には 100％発生し，以下 1cm ごとに，一定割合で発生率を低減させ，2cm 未満で分枝を停止するように定義した。

また，各分枝階の初期伸長量と上位分枝階の伸長量に

ついての解析木の調査結果をもとに，各分枝階の伸長量は上位分枝階の伸長量に比例するものとした。

②成長停止年数

成長停止年数は枝の寿命を表し，1 次枝，2 次枝と分枝階が下位にいくほど短くなる。本モデルでは各分枝階の成長停止年数（S_n）は，次式により枝の発生時に設定した。ただし，S_{n-1} は直近上位分枝階の枝寿命，α_8 はパラメータである。

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

③枯れ枝の着枝年数

2 次枝以下の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。

2.5　トドマツの直径の成長モデル

任意の高さにおける幹の直径（d）は，次式で示される産地及び樹冠級に応じたトドマツの相対成長曲線式 (5) を用いた。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，h は樹高，hl は任意の断面高である。

$$d = \alpha_9 \cdot (h - hl) \quad \cdots\cdots (9)$$

また，枝の直径成長は，実測データを基に，枝の相対成長曲線式のパラメータを推定し，枝先からの長さに応じた位置の直径を推定した。

2.6　成長シミュレーションの手順

成長シミュレーションの処理の手順は以下のようである。

まず，成長パラメータのセット，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 年から設定された樹齢までの成長を計算するループに入り，各成長点から成長･分枝によって発生する枝先の 3 次元座標を次々と求める。

成長のループを抜けてから枝階毎に 1 次枝の消失を求め，最後に幹や枝の太さを求める。この手順により指定されたパラメータで成長した針葉樹の樹形骨格の節点の 3 次元座標と節間の太さが決定する。

ただし，成長のループでは各成長点で以下の判定を行ってから成長の計算を行った。まず，その成長点が最終樹齢まで消失しないでいるか判定し，残っている可能性

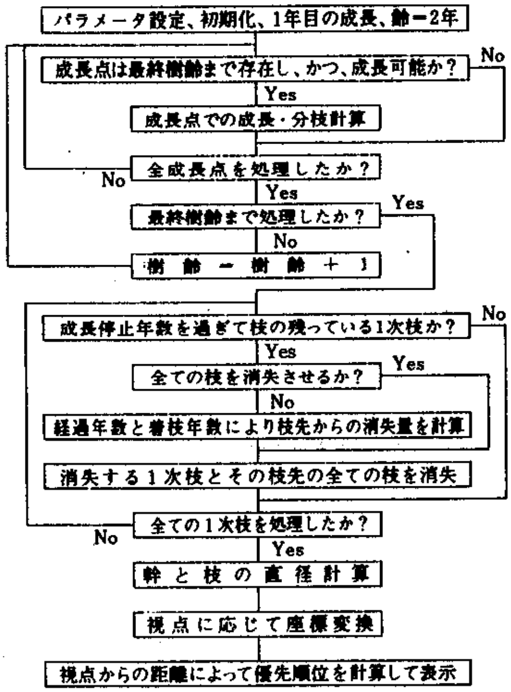

図 3　トドマツの成長シュミレーションの手順

のある枝だけを成長させる。さらに，成長可能な親枝の最少長さを設定しておき，親枝がそれよりも長い場合だけ成長させる。こうした判定により最終樹形に大きな影響を及ぼさない成長計算を省略した。

なお，分枝成長する枝先の 3 次元座標は文献 (6)，(7) で示されている計算式を用いた。

トドマツの成長シミュレーションの手順を図 3 に示す。

2.7　樹形の表示方法

前項の成長シミュレーションで得られたデータに基づいて樹形を表示する方法について述べる。

最初に，視点や表示範囲に応じて樹形骨格の座標を座標変換する。樹形の骨格だけを表示する場合は変換された節間を線で結べばよい。

太さも表示する場合は幹や枝の直径も縮尺を合わせるよう変換する。本報告では以下に述べる簡易的な優先順位法により隠面消去処理を行って樹形を表示した。

まず，節単位で節間中心の Z 座標を求め，Z 座標値に応じてクラス分けをしておく。Z 座標値は視点からの距離情報であり，その大小で前後関係を判断できる。次に視点から遠いクラスに分類された節から順に緑（葉）あるいは黒（幹や太い枝）で塗りつぶしの方法で表示する。

なお，本モデルでは葉を定義していないが，実際の樹木では直径の細い枝あるいは発生年次の新しい枝に多くの葉が着いていることから，こうした枝を緑で表示して葉の代用とした。

3．結果と考察

3.1　トドマツの樹形表示

前項で述べた成長モデルの各種のパラメータを変化させることにより，様々な樹形が得られる。これらのうち樹冠角度と枝垂れ角の組合わせによる樹冠形状の変化を図 4 に示す。

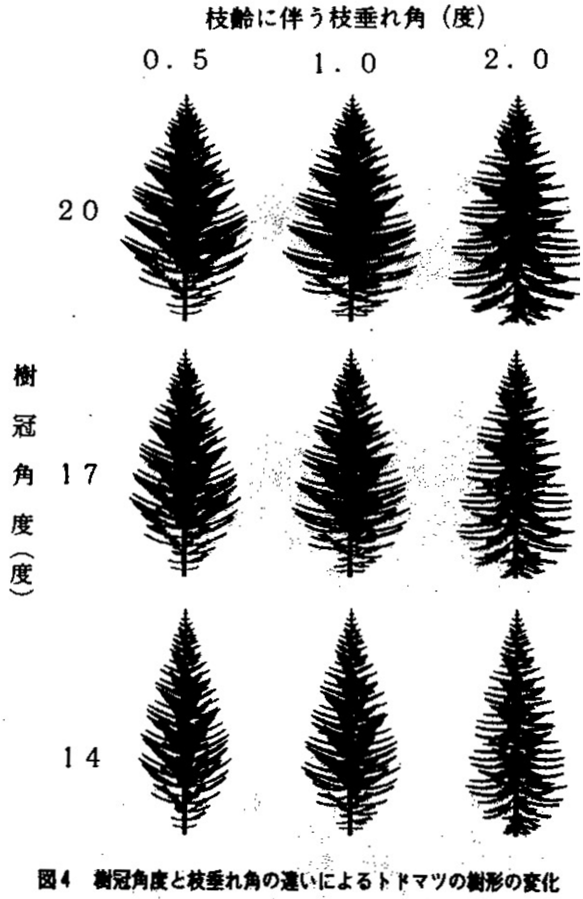

図 4　樹冠角度と枝垂れ角の違いによるトドマツの樹形の変化

樹冠角度と枝垂れ角のパラメータを変化させることにより，モミ属タイプからトウヒ属タイプの針葉樹の樹形表示が得られる。樹冠角度と枝垂れ角のパラメータは 1 次枝の成長，ひいては全体の樹形にに大きく関与し，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。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は，樹冠角度が 20°，枝垂れ角は 0.5 から 1.0 付近が最も妥当な数値といえる。

また，1 次枝の成長停止年数（枝寿命）と各分枝階の枝の成長停止年数（枝寿命）を決めるパラメータの組み合わせにより図 5 に示すように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，成長モデルによって多様な樹形生成が可能なことがわかった。

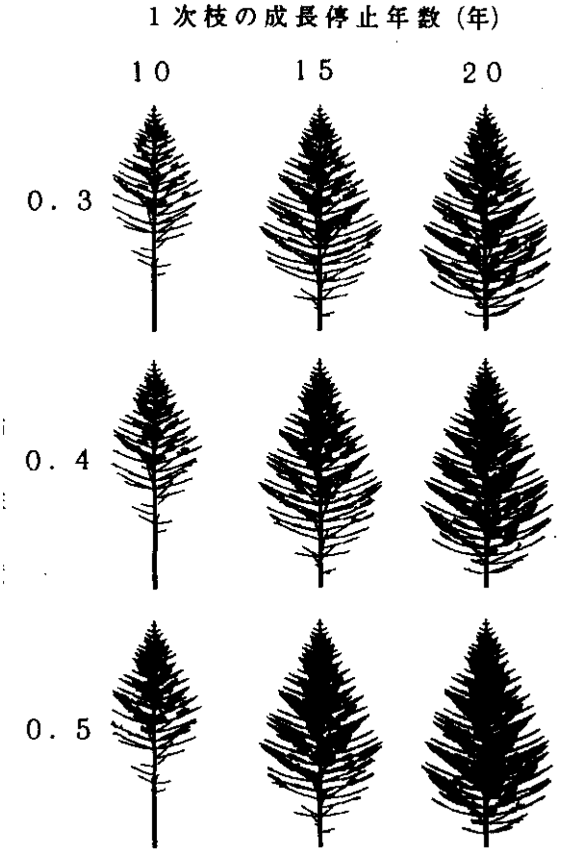

図 5　成長停止年数の違いによるトドマツの樹形の変化

3.2 トドマツの成長シミュレーション

林業分野における景観シミュレーションの利用を考慮すると，経年変化に対応できるモデルが重要である。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景観計画などを示すことが可能となる。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，景観シミュレー

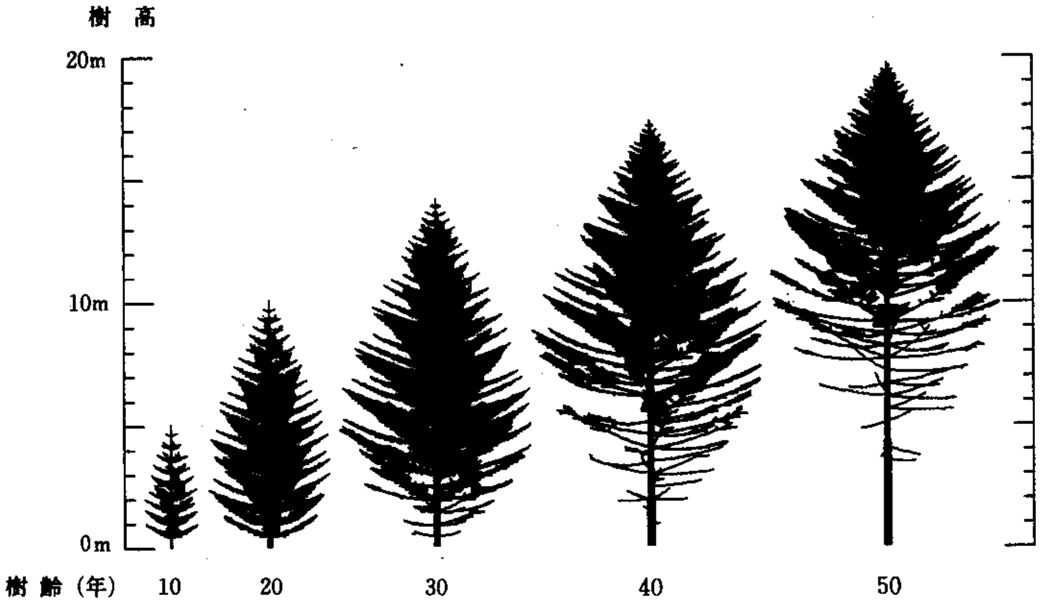

図6　トドマツの成長シュミレーション

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，成長に伴う樹冠形状の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）により変化させてみた。その結果，図6に示すように，時間の変化に対応した樹形が得られた。これらの形状は，現実の樹木の成長をよく表現しており，樹齢に対応したパラメータを使用することにより樹木の成長課程のシミュレーションが可能になる。

3.3　トドマツ人工林の景観表示

より自然的な森林景観を表示するためには，同一林分に様々な樹形を生成する必要がある。そこで，現実林分の測定値を用いて，景観表示を試みた。調査林分は北海道壮瞥町の35年生トドマツ人工林である。この林分を対象に植栽位置，樹高，生枝高，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1240本，平均直径23.0cm，平均樹高16.1m，平均生枝高9.6m，平均投影樹冠径3.64mである。これらの測定結果を基に，樹齢に対応した上述の(1)～(9)式の各パラメータを各個体ごとに推定し，樹齢に対応した各パラメータを用いて過去の成長経過も推定し，画像生成した結果が図7である。

図は現実林分における現在の林分状態をよく表現していると考えられ，単木ごとに樹形を生成し，それらを集合する方法により，林分の景観表示が可能であることが

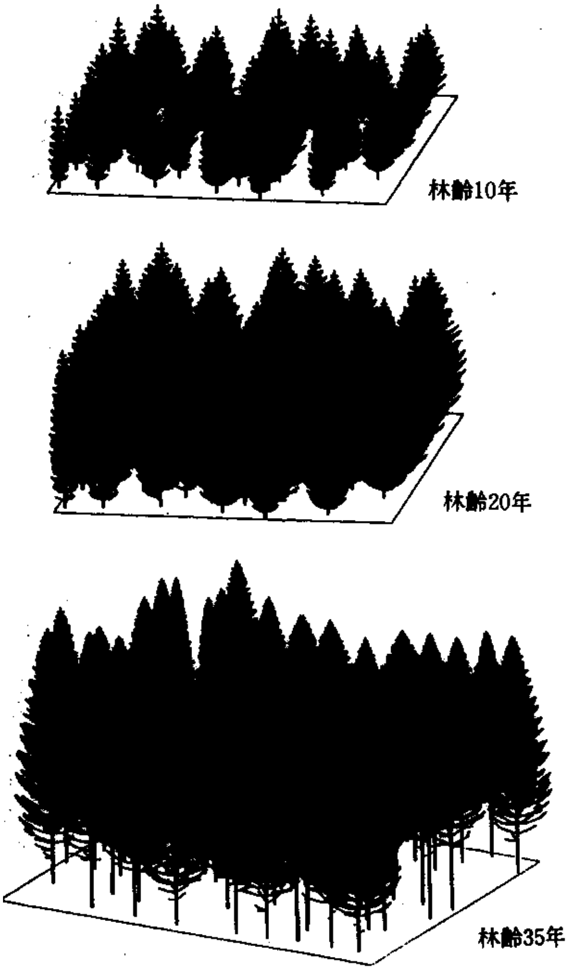

図7　トドマツの人工林の景観表示

分かった。

また，表示に必要なデータを個体ごとに保存しておくことにより,図８に示すように画像上での任意個体の消去や再表示，つまり人工林などの間伐景観のシミュレーションも可能である。

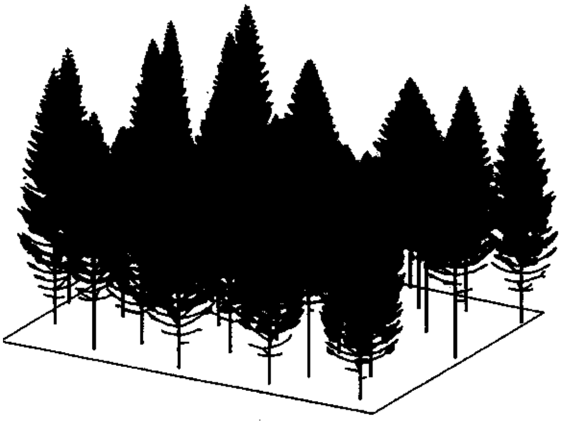

図８　トドマツ人工林の間伐シュミレーション

4. ま と め

本道の代表的な樹種であるトドマツについて，これまでの報告や樹冠解析を補完データとして景観シミュレーションのための樹形生成モデルを作成した。各種パラメータを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，様々な樹形を表現できること及び，間伐シミュレーションも行えることを示した。今後は受光量を考慮した成長モデルへの拡張を行うとともに，結果の表示についても改良していく予定である。

最後に，本研究を進めるにあたり，さまざまなご教授をいただいた岩手大学工学部教授千葉則茂氏，東北大学工学部（現 NTT ヒューマンインターフェース研究所）金丸直義氏，道立林業試験場畠山末吉氏，阿部信行氏に謝意を表する。

参考文献

(1) 千葉則茂：“樹木・草本の生成に関する研究動向” 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会資料 40 12，P.81-86，1989

(2) 大野義夫：“植物を対象とする CG 技術の研究動向” 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会資料 52 3，P.13-18，1991

(3) 阿部信行：“トドマツ人工林間伐の体系化に関する基礎的研究” 北海道立林業試験場研究報告 No.26，P.1-95，1989

(4) 畠山末吉：“トドマツの産地間変異の地域性に関する遺伝育種学的研究” 北海道立林業試験場研究報告 No.19，P.39-69，1981

(5) 小林正吾：“樹木のアロメトリーと樹形” 文部省研究成果報告　63560147，P.2-15，1990

(6) 本多久夫：“樹木の幾何学的模型”数理科学 No.184, P.18-25，1978

(7) M.Aono　and　T.L.Kunii ,“Botanical Tree Image Generation” IEEE CG & A.May，p.10-34，1984