

## 樹形モデルを用いた針葉樹の表現

大崎恵一<sup>\*</sup>、山本 寧<sup>\*</sup>、鈴木悌司<sup>\*\*</sup>、佐藤 創<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> 北海道立工業試験場 電子応用部

<sup>\*\*</sup> 北海道立林業試験場 森林環境部

北海道の代表的な針葉樹について実測データに基づいた樹形モデルを作成し、パラメータの変化によって様々な樹形を表現できることを確認した。

A Representation Method for Needle-  
Leaf-Trees Based on Growth Models

Keiichi OHSAKI<sup>\*</sup>, Yasushi YAMAMOTO<sup>\*</sup>  
Teiji SUZUKI<sup>\*\*</sup>, Hajime SATO<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Hokkaido Industrial Research Institute

<sup>\*\*</sup> Hokkaido Forestry Research Institute

In This paper we first present the growth model of typical needle-leaf-trees in the Hokkaido district designed by taking field data into account. Then we show the various tree shapes generated by the model for different parameter-values.

## 1. はじめに

CG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ことから、手続的形状定義法によって樹木の形状データを生成する方法が有効である。この方法は視点などの位置を自由に設定できるという利点があり、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。

樹木の形状定義法はこれまでにいくつか発表されているが<sup>(1)</sup>、樹齢の増加に伴う針葉樹の枝の垂れ具合や枯れ枝の残枝をリアルに表現できるものはほとんど見られなかった。そこで、枝の成長停止年数や枯れ枝の着枝年数などのパラメータによって樹齢増加に伴う形状変化が表現できる針葉樹の樹形モデルを作成し、成長シミュレーションを行う研究に着手した。樹形モデルは北海道の代表的な針葉樹であるトドマツについて、幹の成長に関してはこれまでの報告例に基づき、枝の発生と成長については実際の樹木の実測データに基づいて作成した。ここでは、トドマツを中心とした針葉樹の形状・成長モデルとトドマツ単木及び人工林の成長シミュレーションについて述べる。

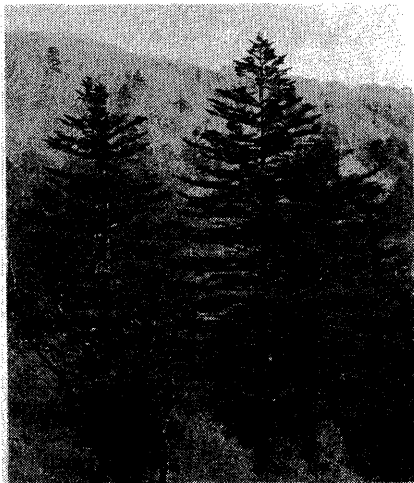


図. 1 トドマツ

## 2. トドマツ単木の形状と成長モデルの作成

トドマツの樹形は大別すると幹（主軸）と幹から発生する枝葉からなり、枝葉からなる部分を樹冠と呼ぶ。幹はほぼ円錐状の樹冠の中心に直立する。枝は幹から発生する1次枝、1次枝から発生する2次枝、以下3次枝、4次枝などがある。1次枝は幹のほぼ同じ高さの所に4本から6本輪生し、2次枝以下の枝はほぼ同じ位置から両側に2本対生する。また発生が規則的な枝の他に、不規則に発生する節間枝がある。さらに、樹齢や枝齢の増加に伴い下枝の枯れ上がりや枯れ枝の残枝が見られる。

従って、トドマツの成長モデルは幹や枝の発生と成長の他に、樹齢の増加に伴う下枝の枯れ上がりや残枝などの形状変化を定義できるように作らなければならない。

発生及び成長は、発生場所から発生割合に応じて分枝あるいは成長方向へ伸長量に相当する長さで枝先の3次元座標を求める。発生割合は実測データを用い、樹高成長量および直径成長量の計算はこれまでの報告例を用いた<sup>(2)(3)</sup>。1次枝以下の各分枝階の成長はこれまでほとんど報告例がないことから、実測データ及び推定値を用いた。また、分枝成長する枝先の座標は文献(4)、(5)で示されている計算式を用いた。

樹齢増加に伴う形状変化を表現するために、

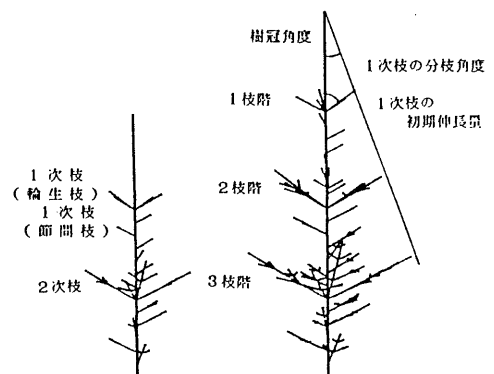


図. 2 トドマツの樹冠の模式図

枝の成長停止年数や枯れ枝の着枝年数などのパラメータを取り入れ、枝は成長停止年数を過ぎると成長が止まり、その後枯死し、成長停止後の経過年数と着枝年数に応じて枝先から順次落枝していくというシナリオで成長モデルを作成した。また、これらに加え、樹勢を表現する手法として活性度のパラメータを取り入れた。

トドマツの形状及び成長モデルは、モデルの原型を作成してシミュレーションを行い、その結果をCG画像によって評価し、モデルの改良を行うという方法で研究を進めた。

成長シミュレーション及び表示の処理手順は以下のようなものである。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年から指定された樹齢までの成長を計算するループに入る。ループでは3次元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、CG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長さを設定して、親枝の長さがそれよりも長い場合だけ成長させる。これらにより結果に大きな影響を及ぼさない計算を省略することができる。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にある変動幅で乱数を用いて上下に変化をつけた。計算方法は文献(5)にある方法を用いた。

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。

### 3. 結果の概要

#### 3.1 トドマツ単木の形状特性の解析

##### ①樹高成長量

樹齢に伴う樹高成長シミュレーションは、地位に応じた樹高成長の推定曲線がすでに報告されている<sup>(2)</sup>。図. 4に示すようにパラメータを変化させることにより樹高成長曲線が得られる。

##### ②枝の伸長量

トドマツの樹冠角度（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）は、北海道の場合、産地によってある程度決まっており、降雪量に応じて遺伝的にある幅の中にあることが報告されている<sup>(6)</sup>。

また、枝の総伸長量は多くの場合  $y = a x^b$  の相対成長式で近似されることが報告されている<sup>(2)</sup>。ここに  $y$  は総伸長量、 $a$  は初期伸長量、 $x$  は枝齢、 $b$  は相対成長係数である。相対成長

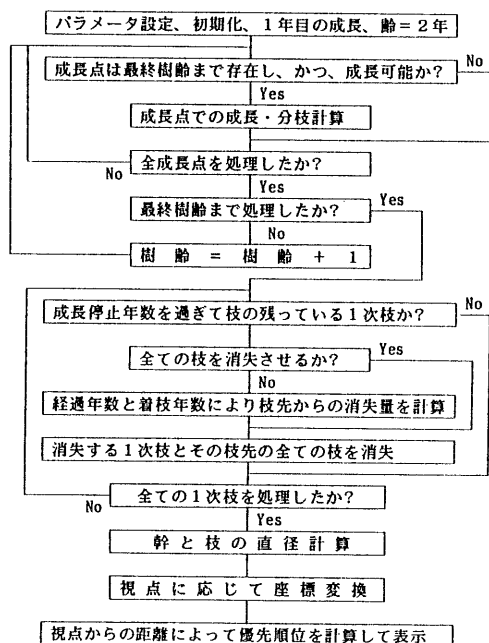


図. 3 成長シミュレーションの手順

係数は枝の伸長量の経年変化を決めるものであり、トドマツは1以下の値である。この指数曲線式で枝の総伸長量を求めるためには枝の初期伸長量を求める必要がある。

トドマツの1次枝は樹冠角度を一定に保ちながら発生することから、1次枝の初期伸長量は樹高成長量と樹冠角度、及び1次枝の初期分枝角度から正弦法則によって計算できる。また、樹冠角度は樹齢に応じて増加するものと仮定し、初期樹冠角度と、増加係数をパラメータで与えて計算した。なお、2次枝以下の初期伸長量は図. 5に示すように分枝の伸長量が親枝の伸長量と直線で回帰することが確認された。

### ③幹の直径成長量

直径成長は、枝に着生する葉の光合成の結果

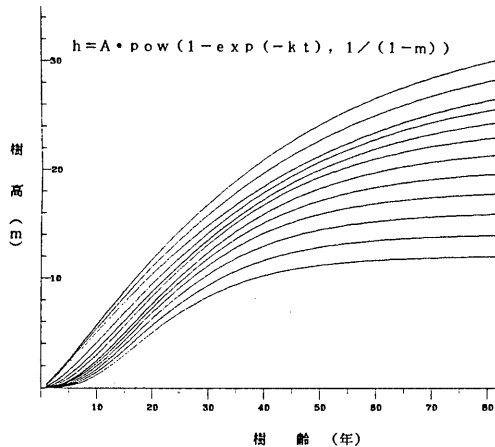


図. 4 トドマツの樹高成長曲線

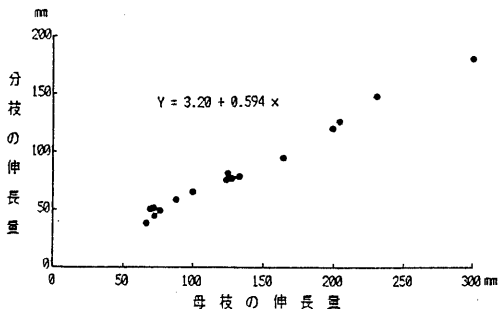


図. 5 親枝の伸長量と分枝の伸長量の関係

である。葉量が多いほど直径成長も多くなることが予想される。基本的には葉量と直径成長との関係を明らかにして直径成長をシミュレーションする必要がある。しかし、トドマツについては葉齢による光合性能の違いなどが明らかでないことから、光合成による直径成長のシミュレーションは難しい。今回はこれまで報告されている<sup>(3)</sup> 産地及び樹冠級に応じた相対成長曲線式を用い、任意の高さにおける幹の直径を推定した。

### ④枝の直径成長量

③で述べたのと同様のことが言えるが、作成した成長モデルでは実測データから、枝の相対成長曲線式を推定し、枝先からの枝長さに応じて任意の位置の直径を求めた。

⑤ 1次枝の着生角度は初期角が40°～65°の範囲にあり、樹齢及び枝齢と共に増加する傾向にある。

## 3. 2 トドマツ単木の成長モデルとパラメータ

作成したトドマツ単木の成長モデルの形状要素別パラメータを表. 1に、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)は樹齢増加に伴う形状変化に関するものである。

樹高成長量 =  $A \cdot \text{POW}(1 - \text{EXP}(-kt))$

,  $(1 / (1 - m))$  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2.8の場合

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

幹の直径 =  $a_2 \cdot \text{POW}(\text{樹高} - \text{地上高}, b_2)$  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

樹冠内部:  $a_2 = 2.245$ ,  $b_2 = 0.951$

樹冠下部:  $a_2 = 3.336$ ,  $b_2 = 0.771$

発生数(輪生枝数) =  $a_3 \cdot x + b_3$  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

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

分枝角度 = (樹齢 - 発生年次) • 増加率 +  $d_0$   
+ 枝垂れ角度 4)

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

枝垂れ角度 = 枝齢 • 年枝垂れ角 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,

個体の寿命 = 100, 年枝垂れ角 = 0.5

当年伸長量 = 当年総伸長量 - 前年総伸長量 7)

総伸長量 = 初期伸長量 • POW (枝齢,  $\alpha$ ) 8)

初期伸長量 = 樹齢にに応じた当年の樹高成長量  
/ SIN (180 - 樹冠角度 -  $d_0$ )

• SIN (樹冠角度) 9)

樹冠角度 = 初期樹冠角度 • POW (樹齢,  $\beta$ )

10)

$d_0$ : 初期分枝角度

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

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

$a_{11}, b_{11}$ : 実測データから求めた成長係数

例.  $a_{11}=0.0595, b_{11}=0.717$

成長停止年数 = 直近上位枝階の成長停止年数

• 活性度 12)

枯れ枝の消失率 = 成長停止後の経過年数

/ 着枝年数 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以上で97.5%, 5cm以上で95%, 4cm以上で72%, 3.5cm以上で50%, 3cm以上で29.5%, 2cm以上で10%, 2cm未満で 0%などとなっている。

### 3.3 トドマツ単木形状の3次元表示

前項で述べた樹形を決定する各種のパラメータを変化させることにより、様々な樹形と成長をシミュレーションできる。

初期樹冠角度と枝垂れ角のパラメータの組合

表. 1 成長モデルのパラメータ

| 形状要素   | パラメータ                                                  |
|--------|--------------------------------------------------------|
| 幹      | 樹高指数、樹齢                                                |
| 1      | 樹高、地上高、産地、樹冠級                                          |
| 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                   |
| 次      | 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 |
| 枝      | 直径                                                     |
| 反重力性   | 枝先からの長さ、相対成長係数                                         |
| 2      | 枝齢、上方向への変動量                                            |
| 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                                          |
| 以下     | 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     | 成長停止年数                                                 |
| 枝の寿命   | 1次枝の寿命                                                 |
| 枯れ枝消失率 | 上位の枝の成長停止年数、活性度                                        |
| 変化     | 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                                             |

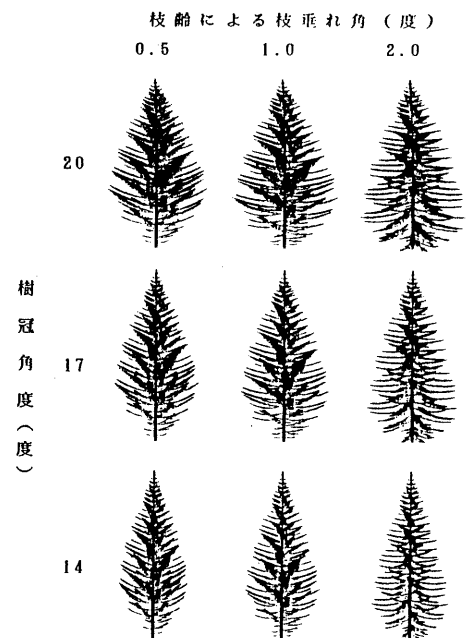


図. 6 樹冠形状角と枝垂れ角のパラメータ

せによる樹冠形状の変化をみると、図. 6 のような樹形が表現される。針葉樹の単木の形状は

樹冠角度（枝の伸長量に大きく影響する）と枝垂れ角のパラメータが全体の樹形、樹種特性に大きく影響していることがわかる。枝垂れ角のパラメータを変化させることにより、トドマツ型からエゾマツ型の針葉樹の樹形表現が可能である。

また、1次枝の成長停止年数と各分枝階の活性度のパラメータを組み合わせることによって図. 7に示すように樹木全体のボリューム感を変化させることができ、樹木の勢いや旺盛さの表現が可能である。ここで、活性度は直近上位枝階から分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。

さらに枝の成長停止年数に着枝年数のパラメータを付加することにより、より多様な樹形の表現が可能になる。図. 8のaとb、及びcとdは同じ成長停止年数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

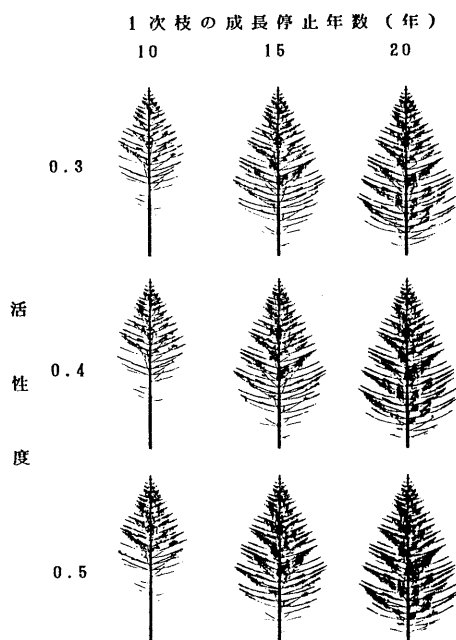


図. 7 成長停止年数と活性度のパラメータ

枝年数が異なる例である。

上記のパラメータを時間（樹齢）に対応させて組み合わせた樹木の成長のシナリオを作ることによって多様な条件下における単木の成長過程をシミュレーションし、CGで表示することが可能になる。

### 3. 4 トドマツ人工林の景観シミュレーション

トドマツ単木の成長モデルと適当なシナリオによって多様な樹形表示と成長シミュレーションが可能になったことが確認できたので、同じ成長モデルを用いて人工林の成長シミュレーション及び、3次元表示を試みた。

図. 9は北海道壮瞥町の35年生トドマツ人工林（森林公園として整備中）の実測データを基にシミュレーションしたものである。調査データは植栽位置、樹高、生枝高、胸高直径、投影樹冠径などであるが、これをもとにしてそれぞれの個体について単木成長のパラメータを決定し、樹林内の樹木を1本ずつ成長シミュレーションした。表示に必要なデータを1本ずつ保存しておき、表示の際に奥行きで表示することにより、同一樹林を任意の視点から見る事ができる。同じ手法によって、画像上での任意個体の伐採シミュレーション（画面からの消去や再表示）が可能である。

また、樹齢のパラメータを変化させることに

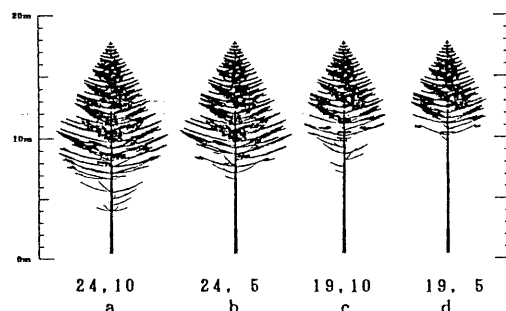


図. 8 着枝年数のパラメータ

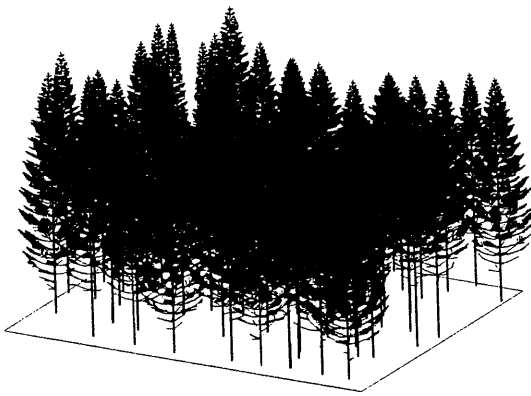


図. 9 森林景観の表示例 (62本)

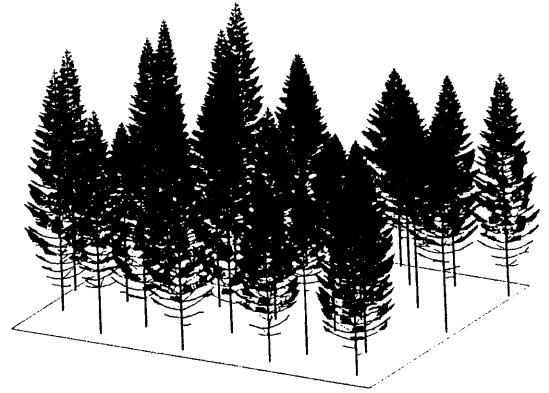


図. 10 間伐シミュレーション例 (30本)

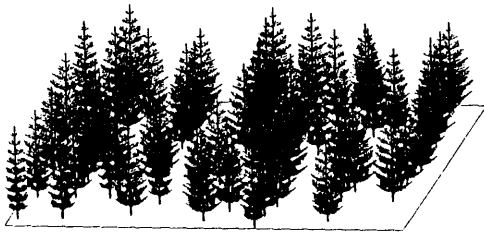


図. 11 人工林の成長シミュレーション  
(上: 10年、下: 20年)

より、人工林の成長過程をシミュレーションすることも可能である。しかし、この場合には個体間の競争による枯損木の発生などは表現できないため、受光量を考慮した成長モデルへの拡張が課題になる。

### 3. 5 針葉樹の単木形状表示

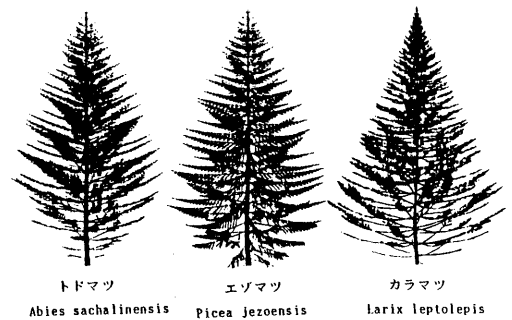


図. 12 トドマツ、エゾマツ、カラマツの表示例

成長モデルと形状パラメータを改良することにより、マツ科のモミ、トウヒ、カラマツ3属の形状表現がある程度可能である。カラマツについては、モデルの改良を重ね、リアルなものにする予定である。特に、カラマツは他の針葉樹に比べ、光を求めて成長する性質が非常に強いいため、受光量を取り入れた成長モデルが必要となる。

### 4. 受光量に関する考察

受光量の推定とそれに応じた成長シミュレーションの必要性は前項で述べた通りである。林内の明るさについては、これまでに魚眼レンズ

を用いた全天空写真の画像解析によって開空度（画像中に占める空の面積割合）を求め、林内の相対照度を推定する試みがなされている<sup>(7)</sup><sup>(8)</sup><sup>(9)</sup>。また、相対照度と樹木の伸長量との関係についても報告されている<sup>(10)</sup>。従って、樹木の各成長点における全天空写真の画像解析から、開空度を求め、その成長点における相対照度と樹種に応じた光合成能との関係から、枝の伸長量を求める手法が有効と考えられる。成長シミュレーションの場合にはその成長点における球面投影図から開空度に相当する値を求める計算を行う。また、葉の量を葉球<sup>(11)</sup><sup>(12)</sup>や円板<sup>(13)</sup>で代用するよりも、樹種に応じた葉の形や大きさ、あるいは葉の付方のデータを調べて実物に近い形で球面投影図を求めた方がより、現実に近い結果が得られると考えられる。

## 5. まとめ

従来の樹形の形状定義法では見られなかった樹齢増加に伴う枯れ上がりや残枝を表現するために、枝の成長停止年数や枯れ枝の着枝年数などのパラメータを取り入れた針葉樹の樹形モデルを作成した。モデルは北海道の代表的な針葉樹であるトドマツについて、これまでの報告例や実測データをもとにして作成した。パラメータの値を変えることによって樹齢増加に伴う形状変化を始め、様々な樹形を表現できることを確認した。また、人工林の実測データを用いて樹林の成長や間伐のシミュレーションも可能であることを確認した。今回作成した成長モデルは、主軸（幹）優勢型の樹種への応用が比較的容易であり、エゾマツ、カラマツなど他の針葉樹の樹形表現についても、モデルの改良により拡張可能なことがわかった。今後は考察の部分で述べた受光量を考慮した成長モデルへの拡張を行い、広葉樹についても成長モデルを作成すると共に、シミュレーション結果の表示についてもよりリアルなものに改良していく予定である。なおシミュレーション及び表示に要する計算時間は樹齢30年時で5～6分、従って樹齢

が30年で50本の樹林を表示するのに4～5時間を要した。最後に樹木の形状モデルに関して有意義な御討論を頂いた岩手大学工学部千葉教授、東北大学工学部金丸氏、及びモデル作成の際にご協力頂いた北海道立林業試験場の研究員の方々に感謝致します。

## 参考文献

- (1)千葉, "樹木・草本の生成に関する研究動向" グラフィクスとCAD研究会 40 12, pp.81-86, 1989
- (2)阿部, "トドマツ人工林間伐の体系化に関する基礎的研究" 北林試報 26, pp.1-95, 1989
- (3)小林, "樹木のアロメトリーと樹形" 文部省研究成果報告書, pp.2-15, 1990
- (4)本多, "樹木の幾何学的模型" 数理科学 184, pp.18-25, 1978
- (5)M. Aono and T. L. Kunii, "Botanical Tree Image Generation" IEEE CG & A. May, pp.10-34, 1984
- (6)畠山 "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" 北林試報 19, pp.1-91, 1981
- (7)玉井, 四手井, "林内の照度(Ⅱ) 全天空写真による解析(1)", 京大演報 44, pp.100-109, 1972
- (8)安藤, "全天写真による林冠の開空度の測定", 林試研報 323, pp.4-8, 1983
- (9)早稲田, "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, pp.9-13, 1983
- (10)石塚, 菅原, 金沢, "林内照度と広葉樹数種の伸長量" 日林北支論 36, Feb., pp.48-50, 1988
- (11)奥村, 小川, "光天球の中で生長する樹形-1-, SCIENCE ON FORM 2(1), pp.59-88, 1986
- (12)金丸, 千葉, 高橋, 斎藤, "向日性による樹木の自然な枝振りのシミュレーション", グラフィクスとCADシンポジウム論文集, pp.167-175, 1990
- (13)安居院, 福田, 中嶋, "景観表示のための樹木の生成手法", 情報処理学会論文誌 Vol.32, No.4, pp.618-625, 1991