

樹形のモデル化について

— スギ・ヒノキ・サクラ類の場合 —

林 拙郎*¹・高橋洋子*²

On the modeling of tree's figure
-Case of *Chriptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Prunus subgen-*

Setsuo HAYASHI*¹ and Yōko TAKAHASHI*²

Faculty Bioresources, Mie University, Tsu Mie 514 - 8507

要 旨

樹形の全体的把握は、森林科学の多くの分野において必要である。樹形の形状を把握するためには樹形のモデル化が必要であり、樹冠構造の解析を行った。本研究では、スギ・ヒノキの樹形について基本的な構成要素である樹冠構造に着目して樹枝の形状を計測し、樹形モデルを検討した。測定因子は、樹枝の地上高と樹枝の先端までの長さ、方位角であり、これよりスギ・ヒノキ樹枝の地上高と樹枝の伸長方向の角との関係について解析を行った。その結果、5、7年生スギ樹枝の伸長は、年間数本の樹枝が幹よりらせん状に高さを増しながら伸長していることが見いだされた。これらの解析結果より、スギ樹枝のらせん状の旋回伸長のモデル化を行い、1次枝から4次枝（葉部）までのすべての樹枝に回転を加えるスギ樹形モデルの作成を行った。このモデルよりスギ樹形の画像表示を行った。また、サクラ類については、樹形の実測値をそのまま使って画像表示を行った。ヒノキについては、樹形解析のみにとどめた。

キーワード：枝、画像表示、樹冠構造、樹形

* 1 三重大学生物資源学部 Faculty of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie 514 - 8507

* 2 飯沼コンサルタント Iinuma Consultant, Co. Ltd., Nagoya 453

ABSTRACT

Grasping the tree's figure is important in the field of forest science. The modeling of tree's figure is necessary in order to grasp a tree's figure, and the crown structure needs to be analyzed. The structural factors of branches and the trunk of *Chriptomeria japonica* and *Chamaeyparis obtusa* are measured by noting that the trees' figure consists chiefly of the crown's structure. The measuring factors are the height above ground, length, and azimuth of branches. The structure of crown is analyzed based on the height and direction of branches. The results indicate that the branches of *Chriptomeria japonica* grow upward with several rotations a round the trunk every year. The image model of this tree figure consists of rotating small portions of the branch based on structural analysis of the tree's crown. The graphic images of *Chriptomeria japonica* are made by using this model. The graphic image of *Prunus subgen* is made by observed data of the branches. These of *Chamaeyparis obtusa* are made from the crown structure only.

Keywords : branch graphic image, structure of crown, tree's figure

1. はじめに

樹木形状の全体的な把握は、森林に関係する各研究者にとって共通する重要な課題である。樹木の形状は、葉の形、枝ぶり、幹の形など一つ一つをみると非常に複雑であり、従来より樹木学において植物学的に考察されてきた。ところが、最近のコンピュータ技術の発展に伴い、一般物質形状のグラフィック表示が可能となってきており、樹木なども全体の樹形表現を行うためにグラフィック処理が行われるようになりつつある。樹木をグラフィック表示する場合、細部の表現は現実に及ばず、植物学的な研究対象ともなり得ないが、樹木全体の樹形表現は、森林を対象とした科学技術的な問題、例えば、風害・樹冠遮断・風致関係などに対して今後期待されるべき研究対象である。

さらに、樹木を樹形として全体的に考察することは、樹枝の配置構造を調べることでもあり、樹枝の配置構造の利用は森林科学の多くの分野に関連している。このように、樹形のグラフィック表示の研究は、結果的に樹木構造を形状から解明することにつながる。しかし、樹形の基本的形状を単なる数理的なシミュレーションとしてのみ議論 (Aono & Kuniji, 1984) をすることは、現実の樹木の成り立ちについての本質を見失う可能性があり、研究方法としては、樹木の基本構造を明らかにして、その上で形状表現を行う (鈴木ら, 1992, 1995) のが順当な方法であると思われる。本論文では、まずスギ・ヒノキの樹形構造を把握するため、現地において樹枝構造の測定を行い、樹木の生長と樹枝構造との関係を考察する。次に、広葉樹・針葉樹を含む樹形表示モデルの全体を考察し、広葉樹の一つとしてサクラ類 (以下サクラと呼ぶ) を取り上げ、サクラの樹形表示をまず行う。次いで、スギの樹枝構造の解析結果から求められるモデル用の例題と実測に基づいて樹形のグラフィック表示を行う。

2. スギ・ヒノキの現地計測

2. 1 計測地の概要

スギの現地計測は、スギ1本を三重大学構内の平地林内で行い、残りの17本を三重大学付属演習林で測定した。演習林内の測定場所は、東俣地区（第1林班ろ小班）の中腹部より下側の斜面傾斜角 21° 、傾斜方向がS85Wの西向き斜面である。測定は、平成（以下Hと略記）7年8月1日と2日に行った。この小班内の測定樹木は、H3年に3年生苗が植栽され、H4年に2年生苗が植栽されたものであり、平成7年8月の測定時点で、樹高が概略2～3.5mの7年生と5年生の樹木である。

ヒノキの現地計測の場所は、スギ計測地の対岸に当たる比較的乾燥した尾根筋（7林班に小班）である。この斜面の傾斜は 27° で、傾斜方向はN52Eの東（北東）向き斜面である。測定本数は18本であり、平成7年8月3日に測定を行った。この小班の植栽は昭和62年に3年生の苗により行われ、測定当時で樹高が概略3～4mの11年生の樹木である（林・高橋，1997）。

2. 2 計測方法

針葉樹の樹形は多くの場合、ほぼ円形の幹があり、幹を中心とした樹枝が放射状に伸びることによって樹冠が形作られ、樹形が形成される。スギ・ヒノキの場合は、正にこれが当てはまるので、計測方法は以下のように行う。

測定項目は、図-1のような幹に沿った樹枝の地上高 z 、樹枝の伸長する方位角 θ 、樹枝の長さ l 、幹の根元径 d の4つである。樹幹から直接伸びる樹枝の高さは、最下部の樹枝に対しては地面からの高さを測り、そのほかは、樹枝と樹枝との樹幹に沿う長さ z_B を計測し、各 z_B を合計することによって樹高を求める。図-1の場合、樹枝 B_2 のつけ根の地上高 z_2 は、次式によって求められる。

$$z_2 = z_1 + z_{B2}$$

樹枝の伸長方向はクリノメータを用いて方位角を計測する。樹枝の長さは、樹枝のつけねから先端までを樹枝に沿って計測する。幹の太さは根元の太さである。このようにして、各樹木の樹枝を下から上方に計測した。

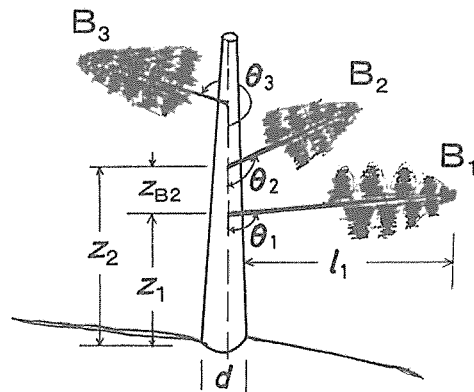


図-1 樹枝の測定因子

(θ は方位角、 z は地上高、 z_B は樹枝間長、 l は樹枝長、 d は根本径)

3. スギ・ヒノキの樹形構造

スギ・ヒノキは幹がまっすぐ鉛直に伸びており、樹冠頭部は円錐に近いが全体としてはパラボラ状である。樹冠は幹から伸びる樹枝によって支えられており、樹冠形は上部からみれば、ほぼ円形をなしている。この樹冠形の特徴を知ることがスギの樹形を把握するために重要である。しかし、これまで植物全般の特徴についての記述（小倉，1944）はあっても、詳しく樹枝構造を測定して解析した事例は少な

い。そこで、この樹冠構造を平面および側面から立体的に解析する。

3. 1 樹冠の平面形状

測定したスギ樹枝の長さや方位角を平面図にプロットしたのが図-2である。お椀を伏せたようなパラボラ状のスギ樹冠内の樹枝を上部から見た形状である。図の縦軸の上側が斜面山側、下側が斜面谷側に対応し、横軸は斜面傾斜方向と垂直な方向である。ただし、樹枝の長さは、樹高で割って無次元化したものである。このグラフは中心が幹軸であり、放射状に伸びた先の点が樹枝の先端にあたる。図中の四角で囲った番号は、地上からの着枝順に対応している。図-3はヒノキの場合である。各図表題中の括弧内のNo. は測定データ番号である。

一般にスギ・ヒノキの樹冠の平面形は、ほぼ円形である(竹下、1985)といわれているが、図-2、図-3の例におけるスギおよびヒノキの樹冠の平面形状は、この例のように単木では必ずしも円形とは認めにくい。一方、斜面上部方向と下部方向の伸長については、この図からは樹枝の伸長にそれほど大きな差が認められない。また、樹冠を構成する樹枝は順序付けした枝を相互にはさむ角が不定の値をとり、かつ下部から上部に旋回するようにして幹から伸びており、樹枝と樹枝とを挟む角は、図-2のスギで平均 173° 、最小値 33° 、最大値 293° 、標準偏差 73° であり、図-3のヒノキで平均 164° 、最小値 52° 、最大値 244° 、標準偏差 52° となっている。このように各個体の樹冠平面形は、個体の特性と外部条件にそれぞれ少しずつ影響を受けている。樹冠の平面形状の全体的特徴を次に示す。

図-4、図-5は、スギおよびヒノキの全データの平面形状を無次元化して示したものである。無次元化は図-2と同様、樹枝の長さを樹高で除して行い、これと方位角より樹枝先端の点を図に落としたものである。図の縦軸上方向が斜面の上側方向であり、横軸が水平方向である。各個体の特性や外部条件の違いは、図-2、図-3のような特徴がみられるものの、全体としての樹冠平面形は、図-4、図-5をみると、スギ・ヒノキとも、ほぼ円形に近いことがわかる。また、斜面上部方向と下部方向のどちらかに偏るような傾向は、スギ・ヒノキどちらに対してもこの図からは特に見られない。詳細は以下で述べる。データの中に大学構内のスギ林内のデータも含まれているが、ここでは平地林の林内データの

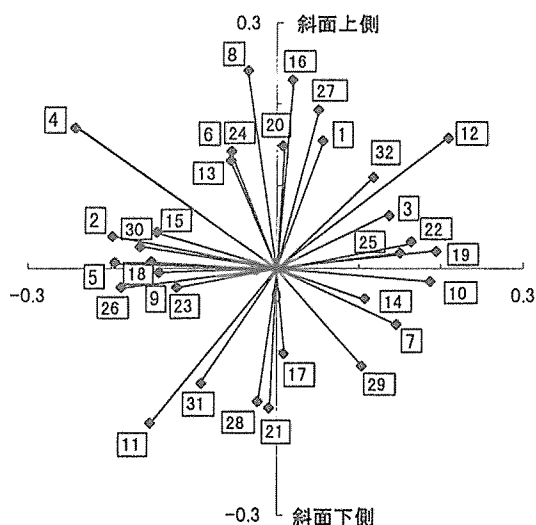


図-2 スギ樹枝の無次元長さ(樹枝長/樹高)と方向 (No. 9)

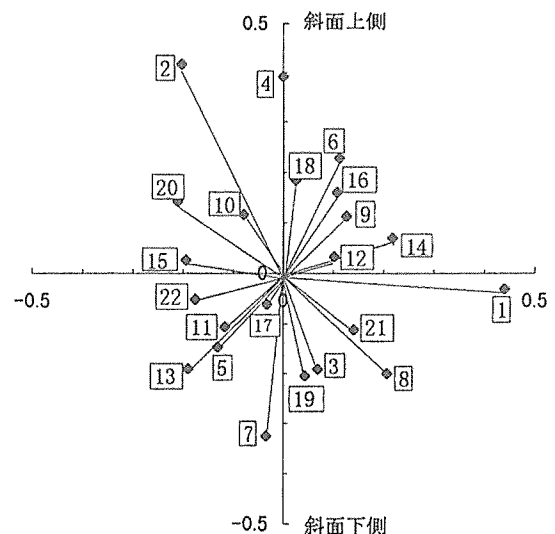


図-3 ヒノキ樹枝の無次元長さ(樹枝長/樹高)と方向 (No.7)

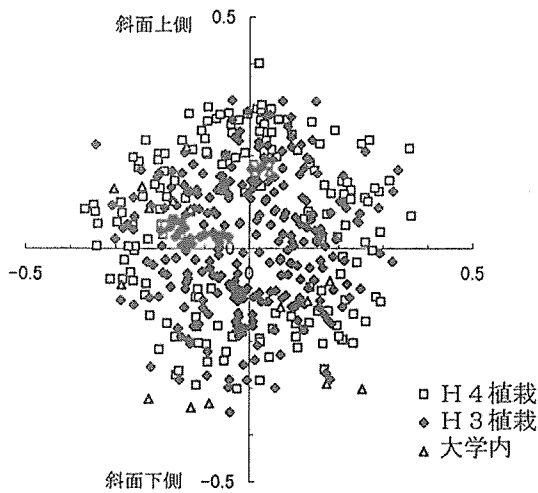


図-4 スギ樹枝の無次元長さ(樹枝長/樹高)と方向(全体)

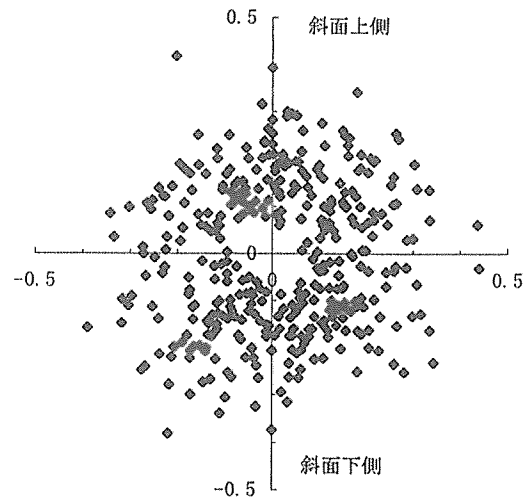


図-5 ヒノキ樹枝の無次元長さ(樹枝長/樹高)と方向(全体)

特徴も含めて示そうとした。大学構内のデータは東西方向よりも北側にあるものを斜面上上側とし、逆の場合を斜面下側として示した。

3. 2 樹冠の側面形状

樹冠の側面形状は、葉部までを含めた樹枝の長さとおさをグラフ上に落とせば示すことが可能である。竹下(1985)は、樹冠形がほぼパラボラ状の形態をとることを示し、以下の近似式を与えている。

$$r = a_0 x^b \tag{1}$$

ここに、 r : 樹冠半径、 x : 樹冠頂から下方への距離、 b : 無次元の指数、 a_0 : (長さ) $^{1-b}$ という次元をもつ係数である。(1)式の係数 a_0 は、立木密度によって影響されるが、指数 b は高密度でも低密度でも変化が小さく、 $b = 0.5$ が成り立つことが知られている(竹下, 1985)ので、本研究でも $b = 0.5$ として検討した。ここで、樹冠形がパラボラ状であることを確認するためにスギ・ヒノキに対して、以下のことを行う。まず、(1)式を地上からの高さを用いて変形し、樹冠半径に樹枝の長さを用い、樹枝の対応する高さを各個体の樹高を用いて無次元化する。こうして、 z を地面から上向きにとると次式のようになる。

$$y = a (1 - z)^{0.5} \tag{2}$$

ここに、 y : 樹枝の長さ/樹高、 z : 地面からの距離/樹高、 a : 係数である。

斜面の山側と谷側の樹枝の長さの相違を調べるために、斜面山側(上側)と谷側(下側)に分けて示す。図-6は、こうして表示したスギの樹冠形である。図中の左側のグラフが斜面上側の樹枝をまとめて示したものであり、ほぼ斜面上側の樹冠形を示すものである。また、右側のグラフは、斜面下側を同様な方法で示したものである。全体として斜面上側、下側でそれほど形状の変化は無く、少しとがったパラボラ状であることがわかる。ヒノキについては図-7に示すが、この場合も同様のことがいえる。

ここで係数 a を求めると

H 3 年植栽スギの場合: 斜面上側で $a = 0.25$, 斜面下側で $a = 0.26$

H 4 年植栽スギの場合: 斜面上側で $a = 0.33$, 斜面下側で $a = 0.35$

H 元年植栽ヒノキの場合: 斜面上側で $a = 0.28$, 斜面下側で $a = 0.28$

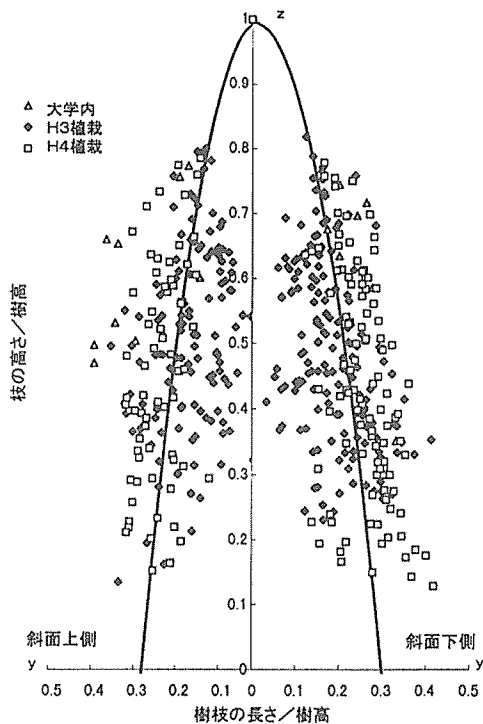


図-6 スギ樹冠曲線(全体) - 高さとの関係

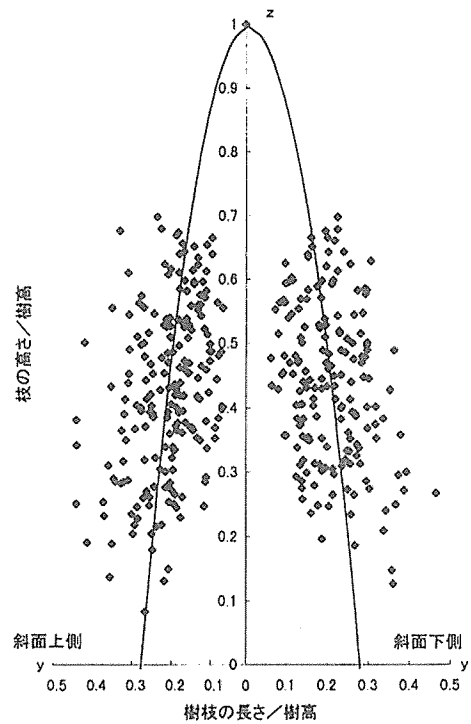


図-7 ヒノキ樹冠曲線(全体) - 高さとの関係

である。全体としては、スギ・ヒノキともに0.3に近い値となっている。係数 a は、スギの場合H3年植栽木よりH4年植栽木の方が大きくなっており、H3年植栽木の上長生長が盛んであるものと思われる。図-6、図-7中の曲線は、求められた係数を用いて(2)式を描いたものである。測定したスギ樹冠のデータは放物線の曲線にほぼ沿っている。これらの結果より、今回測定のスギ・ヒノキの樹冠曲線の縦断形は少しとがった放物線形を示すが、樹冠形状は、(2)式の回転体として表現可能と考えられる。

3.3 樹冠の立体構造

樹冠の立体構造については、樹枝の高さと方位角の関係から考察する。1. 樹形の平面形状で考察したように、スギ・ヒノキは樹高伸長によって、樹枝は相互にある角を保ち、一定の方向に伸長させながら、かつ樹枝の高さを伸長させ、さらに新しい枝を上部につけることによって樹冠構造を形成するものと考えられる。したがって、この幹と樹枝の形態は、樹枝が幹を中心としたら旋状の旋回構造をもつ形態として表現可能である。なお、以後旋回する角を旋回角と呼ぶことにする。

樹枝の旋回方向を地上からみて右回りを正として、樹枝高と旋回角の関係を示したスギの全データのグラフが図-8である。図の縦軸は、樹枝高の高さを樹高で除した無次元の樹枝高であり、横軸は、最下枝の樹枝の向きを基準として測った各樹枝の旋回角(度単位)である。図より樹枝が旋回しながら高さを上げていく様子がわかる。樹枝は春先から伸びるが、同時に樹高の伸長も生ずる。一般に、春先の樹高伸長は大きく、秋にかけて樹高伸長は小さくなるので、単木について図-9のように樹枝高と旋回角の関係をグラフに描くと各年の旋回角に対する樹枝高の伸び率の高いところが春先となり、伸び率の小さく、ほとんどゼロ成長のところは秋から冬であるとみることができる。縦軸と横軸は、図-8と同様である。また、図-9のスギの場合、測定時点で5年生であり、図右上の描かれていない部分が当年

枝であるが、右端の一点のみが当年枝と考えられる枝である。これらを総合的に考慮すると同図のような4段階の成長過程を表す曲線が描ける(当年枝の分を加えると区分としては5段階)。こうしてゼロ成長の点から横軸に垂線を下ろすと、この直線によって、各1年間の成長を区切ることができ、植栽後の成長過程を調べることが可能となる。図-9より成長のよい年と悪い年があることがわかる。もちろん、年数が経ち、成長力が衰えるとこの曲線は頭打ちとなる曲線形状を示すことになる。

さて本報では、樹形のモデル化を目指しているので、測定データの範囲内での旋回特性を調べる。まず植栽後の樹枝からの旋回数を知る。年間の旋回数は、樹枝の旋回数を植栽後の年数で図-9に示したように区切り、区切った区間の回転数を植栽後の年数で割った値とした。区切り方は、ゼロ成長に近づいた後また成長の始まる点を成長年数を考慮して区切る。また、1周当たりの樹枝本数は、区切った区間の樹枝の本数を旋回数で除した値とした。このようにして求めた値が図中の樹枝の旋回数と樹枝の本数である。図-10にも別な個体の同様のグラフを示す。このような樹高と旋回角の関係は、各樹木によって特性が異なる。以後、図-9、10のような樹高と旋回角の関係を旋回特性図と呼ぶ。今回測定したスギのデータの場

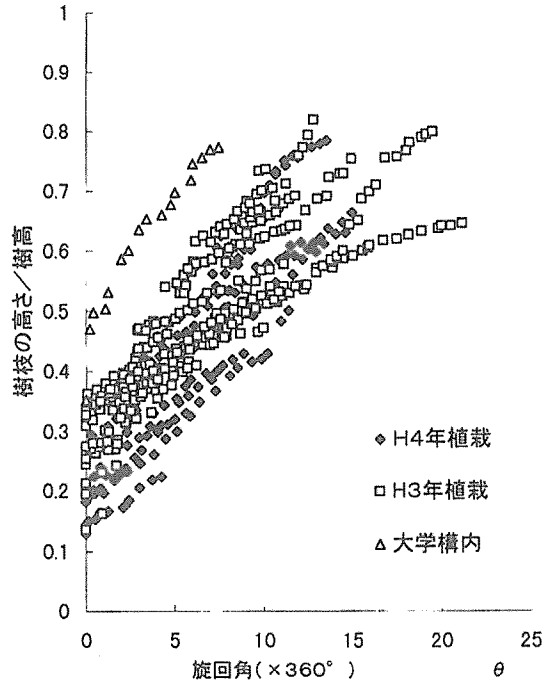


図-8 スギ樹枝の旋回特性(全体)
—高さとの関係

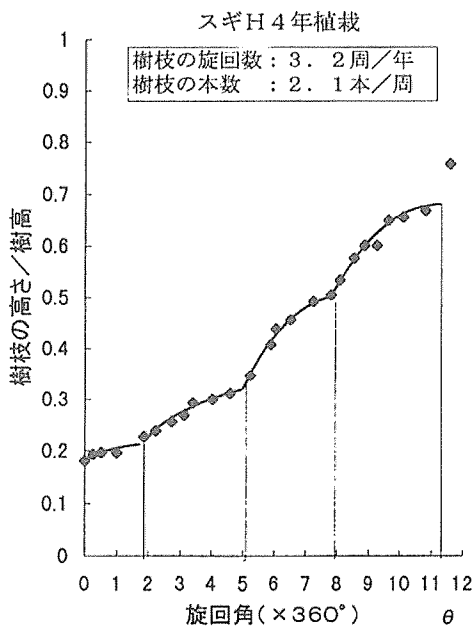


図-9 スギ樹枝の旋回状態(No.12)
—高さとの関係
(縦線は各年の境界を示す)

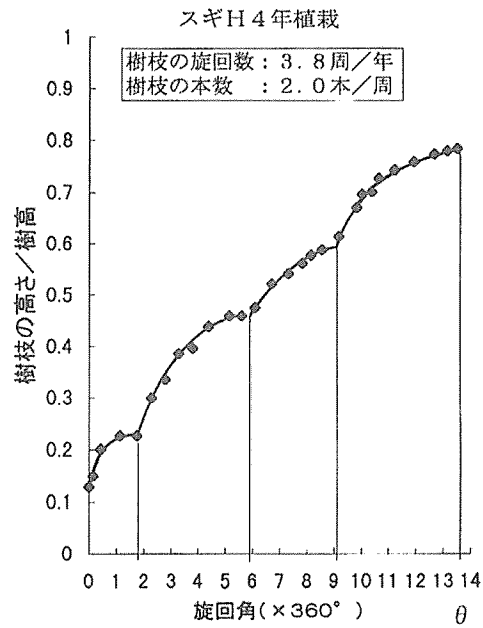


図-10 スギ樹枝の旋回状態(No.13)
—高さとの関係
(縦線は各年の境界を示す)

合、樹枝は年間6本程度新しく伸び、樹枝本数の平均は、1周当たり約2本である。スギ全体としては、表-1に示すような傾向にある。

ヒノキについては、樹木の最上部までのデータが取れたものが無いため、図-9、10のように樹齢で区切ることができないが、図-11に示すように、樹高と旋回角についてはスギと同様の傾向がみられる。

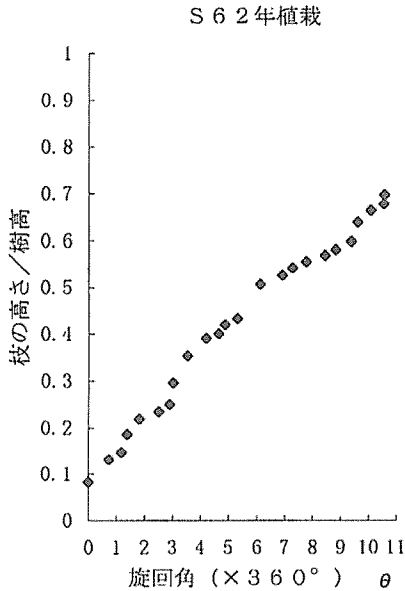


表-1 スギの旋回数と枝の本数

樹木No.	旋回数 (周/年)	枝本数 (本/周)
2	5.0	1.9
3	2.7	2.0
4	2.3	2.2
5	2.2	1.9
6	2.3	2.5
7	3.1	2.3
8	2.5	2.4
9	3.4	2.0
10	2.4	2.4
11	4.4	2.2
12	3.2	2.1
13	3.8	2.0
14	3.3	2.0
15	4.4	1.9
16	3.3	1.9
17	3.8	1.9
18	2.1	2.1
平均	3.19	2.10

図-11 ヒノキ樹枝の旋回状態(No.6)
—高さとの関係

3. 4 スギ・ヒノキの樹冠形状のまとめ

樹冠形状を示す(2)式より求めた樹冠曲線は、図-6～図-7のように放物線の曲線式にデータが沿っていることから、樹冠を側面的にみると、パラボラ状であるといえる。H3年植栽とH4年植栽の樹枝の広がり程度(係数 a)は、H3年よりH4年植栽のスギの方が相対的に大きくなっていることがわかる。樹冠は、この曲線の回転体(パラボラの回転体)となり、樹木を真上から見ると幹を中心とする円形に見えることになる。

今回用いた樹枝の旋回角と樹枝高の検討方法(図-8～10)を輪生状の枝からなるアカマツの場合に適用すると、アカマツの旋回特性図は、不連続的に高さが増し、そこで水平方向に旋回した枝が図-12のようなグラフ上の点として表示されることになる。この検討方法は他の樹種に対しても応用が可能である。

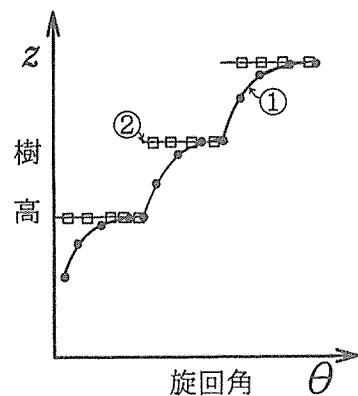


図-12 代表的な針葉樹の樹高と樹枝旋回角の関係

(①スギ・ヒノキ型、②アカマツ型(輪生)の模式図)

4. 樹形の表現モデル

樹形構造の基本因子としては、以上の考察で示されたような幹を含めた樹枝長 l と方位角 θ があるが、一般的にはさらに高低角 ϕ 、樹枝の付け根径 d が必要であり、計4つの因子があげられる。これらの関係は図-13に示すような関係にある。以下樹形の表現方法を考えるが、針葉樹は、これまでの解析のように幹の中心に枝が出ており、比較的モデル化がやりやすいのに対して、広葉樹の場合には、幹自体が高低角 ϕ で傾いている。針葉樹の幹の場合、 $\phi = 90^\circ$ で下から上までほぼ一定としてもよいが、一般的な樹形表現を考えるには図-13のような広葉樹を対象にして以下考える。

4. 1 樹形構造とデータの構造

広葉樹の樹形表示にあたっては、1本の樹木の樹枝中で1番長い樹枝を幹と考え、幹から直接伸びる樹枝、つまり1次枝を下から順に B100、B200、B300…とする。1次枝 B100 から直接伸びた2次枝を元の方から順に B110、B120…とし、1次枝が B200 のときには、2次枝を B210、B220…とする。2次枝の場合も同様で、2次枝 B110 から直接伸びる3次枝を元の方から順に B111、B112…とし、2次枝が B120 のときには、3次枝を B121、B122…とする。4次枝以後も同様である。樹木全体に対して番号をつけた例を図-14に示す。このようにして樹枝に番号をつけることによって、樹枝と樹枝相互の関係、つまりどこに着枝する樹枝かわかるようにする。

樹枝データの作成方法は、地面から何個めの節から樹枝が伸びているかを数え、その樹枝のデータがないところには0を、樹枝データがあるところには必要なデータ D (l, θ, ϕ, d) を縦に入れていき、先端まで続ける。この考え方でデータを並べた例を、図-15に示す。こうすると地面からいくつめの節から樹枝が出ているかわかる。データのブロック順は、まず幹が先で、次に幹から直接出る1次枝 B100 のデータブロックをひと組として書き、次に B100 に関するデータを並べる。以後 B200、B300 と順番に行う。プログラム上の全体的並べ方を図-16に示す。

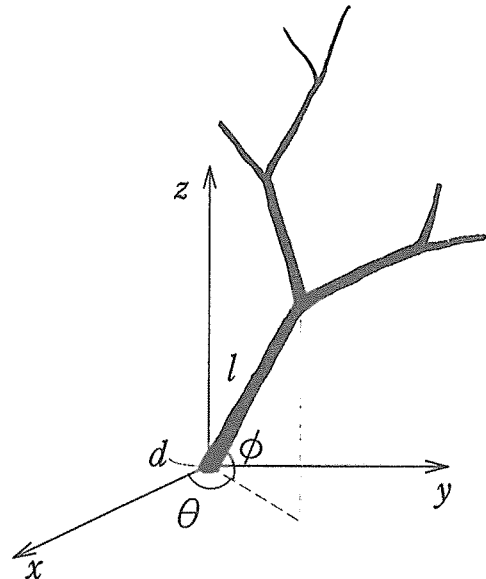


図-13 樹形表現の基本構造

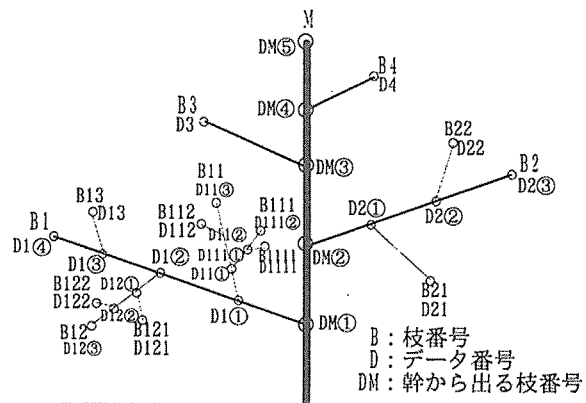


図-14 広葉樹（サクラ類）の樹形構造

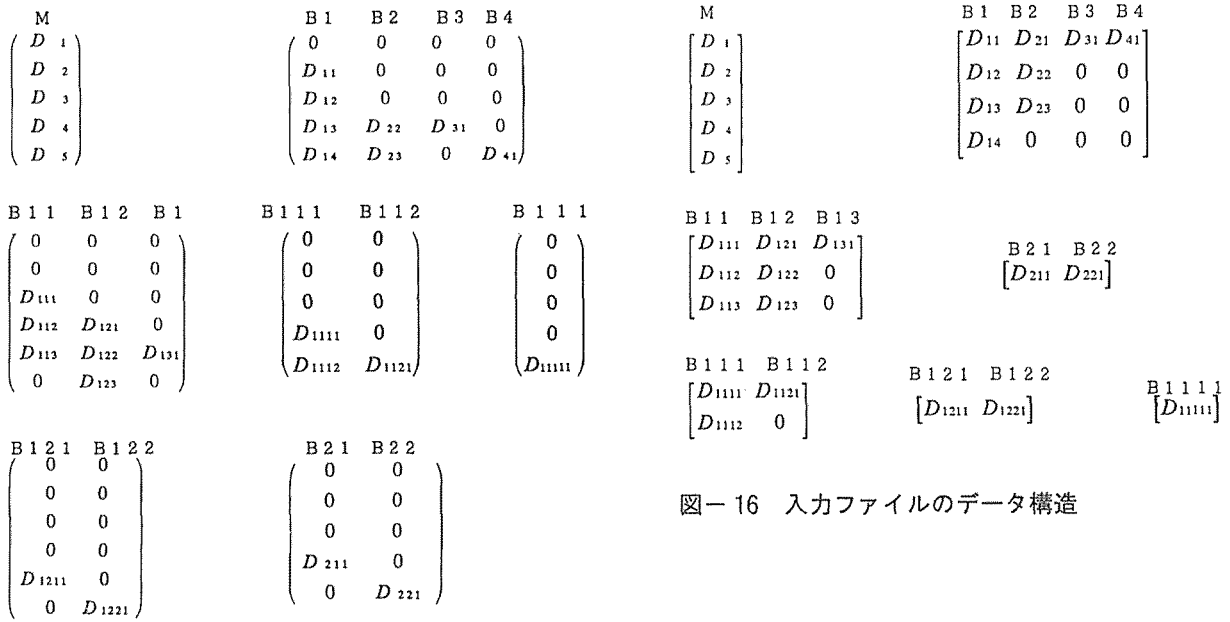


図-16 入力ファイルのデータ構造

M : 幹からでる枝の位置 (X, Y, Z) の座標情報
 B i : D i からでる枝の側枝の位置 (X, Y, Z) の座標情報
 D i : 枝の長さ・方位角・高低角の情報

図-15 樹枝のつながりの捉え方

4. 2 樹枝の基本構造と計算方法

(1) 樹木の基本構造の取り扱い方

まず、樹木の基本構造を幹も含めてすべて樹枝と側枝の関係に分解して考える。分解した場合の各樹枝の樹冠内の順序付けは、上で述べた方法で行い、順序付けしたデータを各樹枝に対して属性データとして与える。こうすると、幹や樹枝あるいは樹枝と側枝の接続方法は次のように定式化することができる。各樹枝の分岐点の中心座標は、方位角 θ 、高低角 ϕ 、分岐点間の長さ l を用いて次式で求める。

$$\begin{aligned} x &= l \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \\ y &= l \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi \\ z &= l \cdot \sin \phi \end{aligned}$$

最下部の地上高をゼロとして上式の相対座標値を下部から加算することで、樹枝分岐点の絶対座標値が求められる。この絶対座標値が樹枝分岐点の中心座標である。この中心座標に基づいて幹や樹形を描くために、幹や樹枝の形はすべて円錐形とし、幹の下部と樹枝の付け根の太さを与えて算出した。つまり、樹枝と樹枝との間は今回すべて直線で表す。樹枝の付け根の太さは、実測値を用いたが、実測値がない場合は、その点の幹や樹枝のふとさに基づいて算出した。広葉樹などの樹枝の

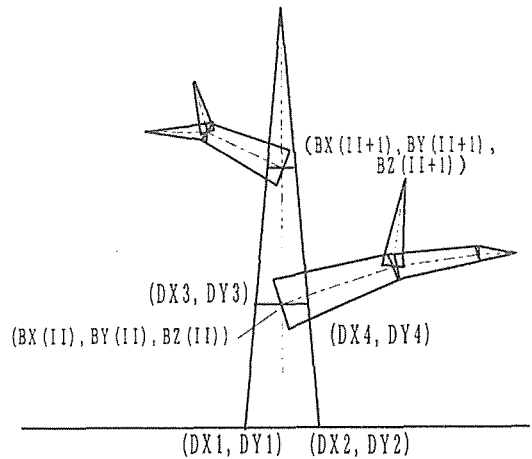


図-17 樹枝と側枝の接し方

付け根部でみられるゆるやかな曲がりやふくらみについては今回すべて無視した。

樹枝と樹枝との接続方法は、図-17に示すように平面上の樹枝の太さに対しては樹枝の部分の中心座標値を平面上に射影し、樹枝中心を相互に結ぶ直線と垂直な直線を平面上に射影した直線によって太さを与える。樹形の側面図に対しては、樹枝の中心座標を側面上に投影し、樹枝中心を通る直線と垂直な直線を側面上に投影した直線と与え、樹枝と樹枝の接続部は次の樹枝を結線してから画面表示を行う。樹枝の付け根の太さは、実測値がない場合は、その点の幹や樹枝の太さに基づいて算出した。

(2) 樹枝の回転方法

図-18に、樹枝・葉の向き回転角 β と伸長角 α を示す。樹枝を軸としたときの側枝の回転角 β は、数学的には任意の軸の回りの回転角 β として与えられ、原点上で回転させてもとの枝に平行移動させることによって新しい側枝の設定を行う(中前・西田, 1991)。任意の軸の回りの回転は、具体的には次の順に考える。

- ①任意軸の始点を座標系の原点に平行移動し、伸長角 α に対する長さ l の位置ベクトルの座標 (x, y, z) を求める。
- ②移動した軸を $x-y$ 平面上に z 軸に時計回りに回転する。
- ③ $x-y$ 平面上の軸を y 軸について回転し、 z 軸と一致させる。
- ④ z 軸を中心に必要な角 β を時計回りに回転させる。
- ⑤③の逆を行う。
- ⑥④の逆を行う。
- ⑦①の逆を行う。

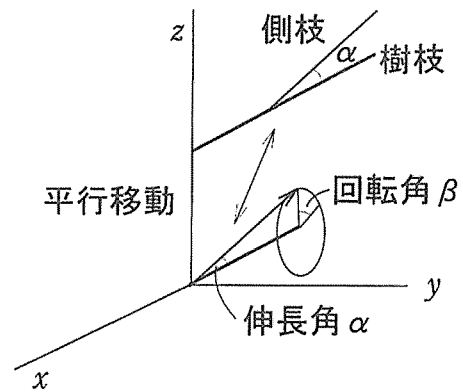


図-18 樹枝・側枝の旋回方法

2次枝以降の側枝を角 β 回転させるときに必要な計算式は、回転の軸となる樹枝の単位ベクトルを $N = (w, u, v)$ 、回転前の座標を (x, y, z) 、回転角度を β 、回転後の座標を (X, Y, Z) とすると次式で表される(中前・西田, 1991)。

$$X = \{u^2 + (1 - u^2) \cdot \cos \beta\} \cdot x + \{u \cdot v \cdot (1 - \cos \beta) - w \cdot \sin \beta\} \cdot y + \{v \cdot w \cdot (1 - \cos \beta) + v \cdot \sin \beta\} \cdot z$$

$$Y = \{u \cdot v \cdot (1 - \cos \beta) + w \cdot \sin \beta\} \cdot x + \{v^2 + (1 - v^2) \cdot \cos \beta\} \cdot y + \{v \cdot w \cdot (1 - \cos \beta) - u \cdot \sin \beta\} \cdot z$$

$$Z = \{v \cdot w \cdot (1 - \cos \beta) - v \cdot \sin \beta\} \cdot x + \{v \cdot w \cdot (1 - \cos \beta) + u \cdot \sin \beta\} \cdot y + \{w^2 + (1 - w^2) \cdot \cos \beta\} \cdot z$$

スギやサクラの場合、実測値より、樹高、樹枝高、太さ、方向、長さが求められているので、これをそのまま用い、各側枝についても樹幹と樹枝の関係を1次枝-側枝の关系到置き換えて、スギの場合には部分の中に全体を表すようにフラクタル構造として考える。こうして、樹木に対する樹形表示のプログラム(tree. bas)を作成した。

5. サクラ樹形の表現モデル

スギの樹形表現を行う前にスギより難しいと考えられる広葉樹の表現について考える。広葉樹の樹形のモデル化は針葉樹より難しいので、樹枝に関する実測データを使ったサクラの樹形表現を考える。そのために針葉樹と同様、まずサクラの樹形の実測を行う。

サクラは、三重大学構内の正門付近で平成7年11月下旬に測定を行った。時期が遅かったため、葉はほぼ落ちていたが、樹枝については詳しい計測が可能であった。測定するデータの項目は、先の図-13に示すような幹を含めた樹枝と横枝との間の長さ l 、樹枝の方位角 θ 、高低角 ϕ 、付け根径 d の4つである。方位角、高低角はクリノメータで測定した。広葉樹の場合は、基本となる幹の区別が難しいが、一番高い樹枝を基本の幹とし、分岐する枝までの区間の l 、 θ 、 ϕ 、 d をすべて計測した。

5. 1 サクラ樹形モデルと計算方法

サクラの葉部については画像表現上目立つようにするために、今回サイズを少し大きめに設定し、以下のようなモデルとした。葉部は、今回6cm間隔とし、幹の先端部と樹枝全部に左右交互につける。1ヵ所3枚とし、樹枝に垂直に1枚、平行に2枚つける。葉の形はとりあえず楕円形とし、長径を10cm、短径を6cmとする。今回の葉のつけ方を図-19に示す。葉のつく面は樹枝を含み、樹枝を水平面上に投影したときの樹枝直線に垂直な水平面上の平面とする。この樹枝の投影線と垂直な方向の直線の式は樹枝の部分の相対座標を (x, y, z) とすると、原点上で

$$Y = - (x / y) X, \quad Z = z$$

の式で表される。ここに、 X 、 Y は平面上の点であり、 Z は樹枝の高さを表す。原点から葉部までの長さ（今回は5cm）を与えて葉部を楕円で描く。

上の式から葉を描くときには葉（楕円）の中心の位置座標を求め、枝につく角度（平行か垂直）に合うように原点で回転させ、樹枝と同じ高低角を与え、つくべき枝の葉部中心の位置に平衡移動させる。

5. 2 表示プログラムの特徴と画像表示

プログラムの特徴は以下の通りである。

- ①プログラム (tree. bas) は、MS-DOS上のQuic BASICで作成した。
- ②カラー表示はしたが、単純な表示のみにとどめ、レイトレーシング等の技法は用いなかった。
- ③カラー表示に54色中の7色を用いた。幹・枝は32番と56番と7番と35番で図-17のような四角形の上下方向をLINE命令で結ぶ。葉は、16番と50番と34番で楕円の枠の上下をLINE命令で結ぶ。樹枝と葉の内部をLINE命令で描くことによって中間色のカラー表示を生成させる。

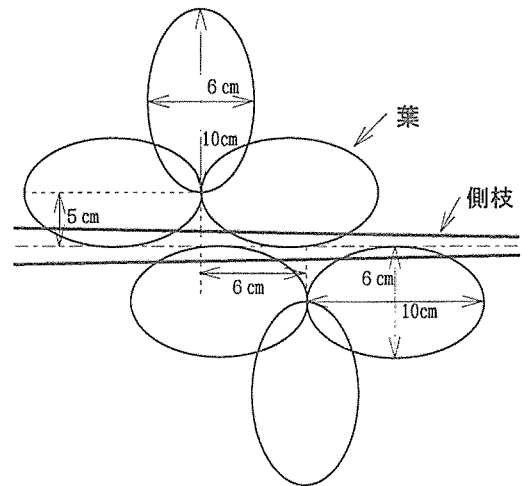


図-19 サクラ類の葉部の表示モデル
(サイズは少し大き目の値を仮定)

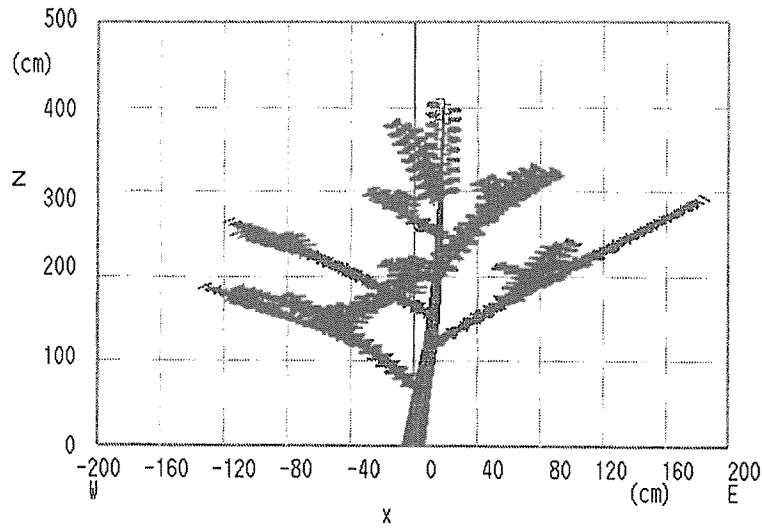


図-20 構内サクラ類の表示例（東西面を南から描画）

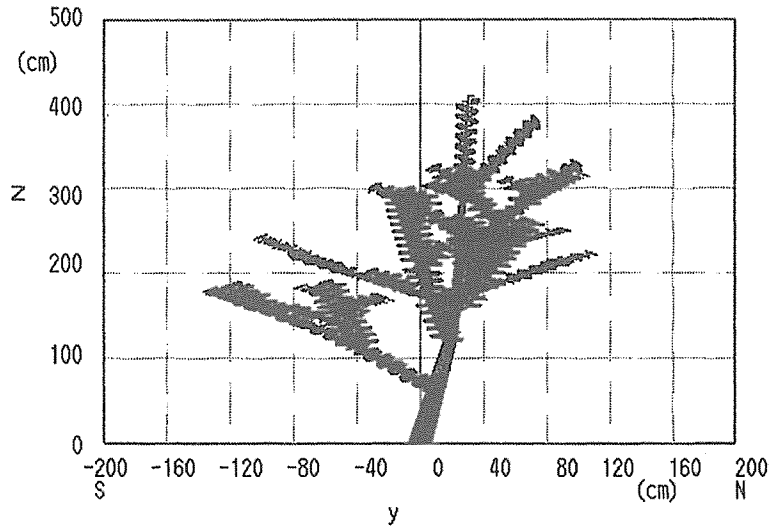


図-21 構内サクラ類の表示例（南北面を東から描画）

以上のような方法で構成したサクラのカラー表示画像の印刷結果（白黒画像）を図-20、21に示す。図-20は東西面を南から描画した画像であり、図-21は南北面を東から描画したものである。

6. スギの樹形表現

第3章のようなスギ・ヒノキの樹冠構造の解析結果に基づいて、主にスギの樹形表現モデルを考える。ここで示そうとすることは、細部はともかくとして現存しているスギ、つまり測定したスギの樹形表現である。これを行おうとするときに、細部まで測定してない現在のデータのままで、いかに現存する一本の樹木としての特徴を画像表現の中に現実感を持たせて表現するかということが重要である。測定本数はそれほど多くなかったにせよ、現存する樹木の樹冠構造の解析結果をもとにできるだけ単純に表現

し、樹形表現の本質的な特徴を探ることが必要である。

6. 1 スギ樹形モデル

スギのモデルを図-22に示す。側枝の名称については、前述のサクラの場合と同様に幹から直接伸長する樹枝を1次枝とし、1次枝から伸長する側枝を2次枝、2次枝から伸びる側枝を3次枝、3次枝につく枝を4次枝とする(鈴木ほか、1995)。今回のスギでは、4次枝を葉部とする。幹と1次枝は、図-1のように旋回させ、2次枝以降も樹枝のまわりに回転させて、かつ枝との間に伸長角を与えて伸長させることにする。そこで、スギ樹枝の構造解析の結果より、次のような樹形モデルを設定する。

- ①幹と1次枝は、実測データ(例題では仮定したデータ)を与える。
- ②スギ樹枝のら旋状旋回構造を参考に、1次枝から4次枝までの枝をすべて幹または樹枝を軸として回転させる。
- ③側枝を樹枝のまわりに β 角回転させ、かつ樹枝との間に伸長角 α を側枝に与えて伸長させる。
- ④スギでは4次枝を葉部とし、4次枝の密度(単位長さ当たりの本数)を高くする。

さらに、今回モデル化できなかった細部構造を次のように設定する。

- ①1次枝の長さおよび方位角: 実測値を用いる。スギ例題では樹高を仮定して(2)式より樹枝の長さを与え、方位角はランダムとする。

1次枝の長さおよび伸長角:

$$\alpha = 80^\circ \text{ (2次枝以降も同様)}$$

- ②2次枝の回転角:

ランダム(3次枝以降も同様)

2次枝の枝間隔: 5cm

2次枝の枝長: 20cm

- ③3次枝の枝間隔: 2cm

3次枝の枝長:

先端で短く、根元で長くなるような放物線式で設定

- ④4次枝(葉部)の間隔: 0.3cm

4次枝(葉部)の枝長: 先端で短く、根元で長くなるような放物線式で設定

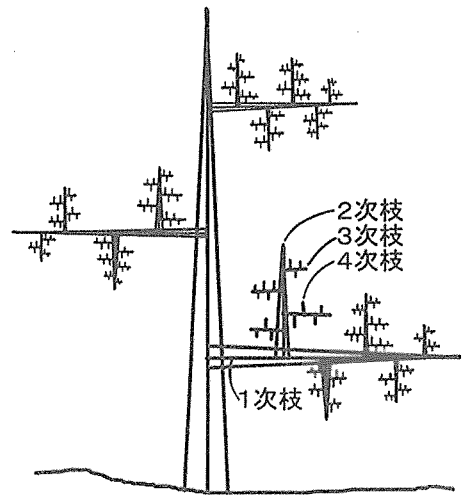


図-22 スギ側枝のモデル化

6. 2 スギ樹形の画像表示

樹枝が回転して側方に伸長するスギ例題の様子を1次枝、2次枝、3次枝の順に図-23~26に示す。ここでは、4次枝を葉として密度を濃く表示させている。図-23が2次枝まで描いた結果であり、図-24が3次枝まで描いた実行結果である。図-25は4次枝(葉部)まで描いた最終結果である。図-25の例題の拡大図を図-26に示す。2次枝以降のランダムに発生させている部分は、両図で若干異なっている。

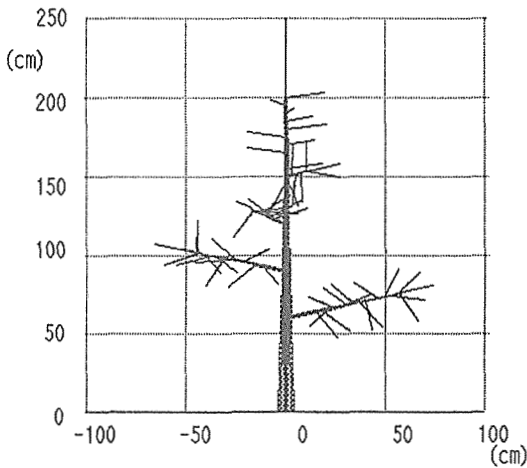


図-23 スギ例題の樹形表示（2次枝まで表示）

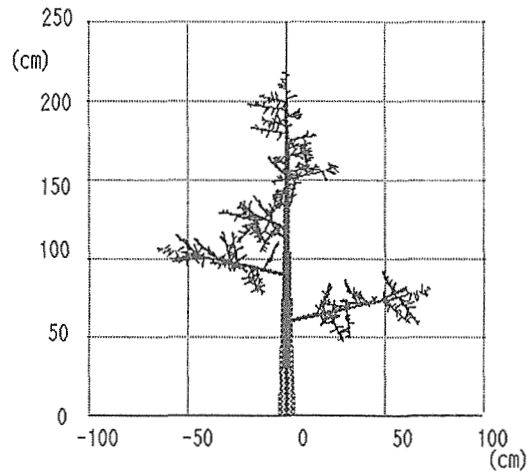


図-24 スギ例題の樹形表示（3次枝まで表示）

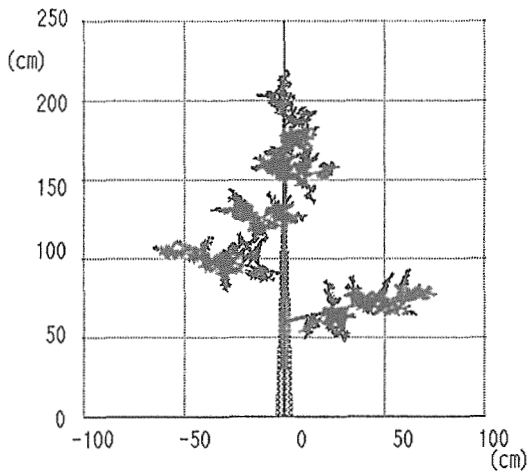


図-25 スギ例題の樹形表示
（4次枝（葉部）までの全体表示）

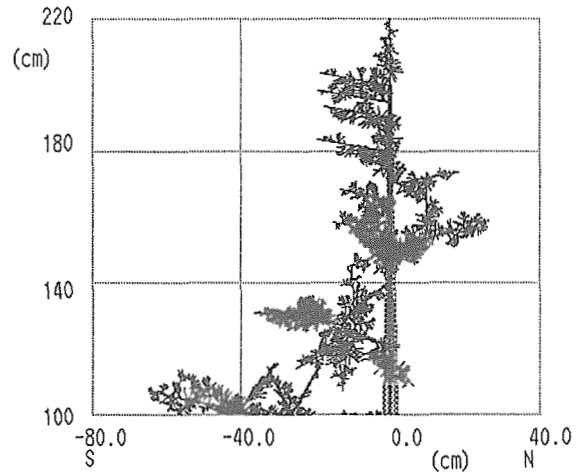


図-26 スギ例題の樹形表示（拡大図）

さて、演習林の1次枝まで実測されたスギデータの場合どのようになるであろうか。図-27が、演習林の7年生（H3年植栽）スギの拡大図である。本モデルにおいては、樹枝そのものをらせん構造としているために、樹木のフラクタル性が保存されており、画像の拡大によってもそれほど粗さが目立たないものとなっている。色の色調や、3次枝以降の枝のつけ方については実物の計測をもう少し詳しく行い、細部構造をモデル化する必要がある。

本研究は、1. はじめにでも述べたように森林に共通する課題として一般樹木の樹形のモデル化を目指したものである。針葉樹については、ここで示したようにスギ・ヒノキを中心としたものであり、画像作成としてはスギに対して行った。輪生状の針葉樹（トドマツ）に対する画像化を目指したものとして鈴木ら（1992）の研究があるが、それ以外の樹形のモデル化については広葉樹と同様、困難な点が残されていた。造林木の場合、密度や施肥などによる樹冠構造への影響については明らかにできなかったが、本研究によって若齢の単木樹形の構造化手法が明らかになり、樹形のモデル化としても、ほぼ大枠が確立されたものと思われる。

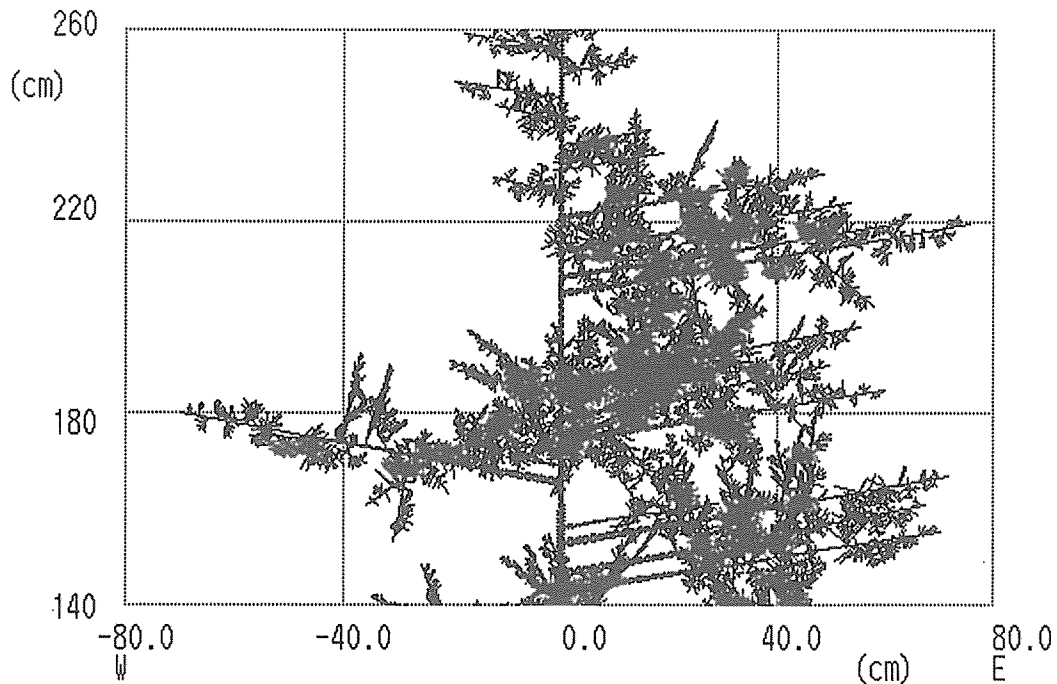


図-27 演習林スギの樹形表示（拡大図）

7. ま と め

スギ・ヒノキの樹形計測に基づいて、平面的・立体的な樹冠構造の考察を行った。その解析結果より樹冠形状はパラボラ状であること、および樹冠内部においては幹から横方向に伸長する樹枝がらせん状に高さ方向を形成しており、幹に対する樹枝の旋回構造が基本的にスギ・ヒノキなどの針葉樹の樹冠形状を特徴づけていることを示した。旋回数、年によって違いはあるものの、スギでは1年間で3周から4周程度である。幹から1本の枝が出てから次の枝が出るまでの旋回角は 30° ～ 280° と幅広く分散しているが、平均ではほぼ 180° であり、1周当たり約2本の枝がついていることになる。スギをさらに、2次枝について観察すると、1次枝に対して2次枝も旋回して側枝となっており、3次枝も2次枝に対して旋回して側枝を伸長させている。基本的にスギ・ヒノキの樹冠構造は、樹枝の旋回構造によって特徴づけられることがわかる。

次に、樹形画像の一般モデルを作成し、サクラ類（文中ではサクラと表記）の表示を試みた。葉の部分の詳しい描画は省略したが、大略その特徴がおさえられており、他の広葉樹類への発展が望めそうである。針葉樹（スギ）については先の樹枝構造の解析結果より、スギの画像表示モデルとして幹に対する樹枝および樹枝に対する側枝が回転したモデルが考えられる。そこで、1次枝から4次枝（葉部）までを旋回させたスギ樹形モデルを作成し、画像を表示させた。この画像には、樹枝の旋回構造がみられ、樹木のフラクタル性が保持されている。樹枝の旋回特性は、樹形の重要な構成要素であると考えられる。したがって、本樹形モデルは樹木の一般的な形状モデルとして拡張可能であり、汎用性があるものと考えられる。今回の解析より、樹形のモデル化は画像による樹形表現を可能にするが、その結果は本質的に樹形モデルに依存していることが分かる。今後、さらに実測に基づく詳細なモデルが必要である。ま

た、このことによって、樹枝構造が解明され、森林科学の各技術分野に応用されるものと思われる。

本研究には、文部省科学研究費（研究代表者、名古屋大学大気水圏科学研究所・福嶋義宏教授）の一部を使用した。研究の機会を与えられた福嶋義宏博士にお礼を申し上げる次第である。

引用文献

- (1) Aono, M., Kuniiji, T. (1984) Botanical tree image generation. IEEE Computer Graphics and Applications 4 (5) : 10-34.
- (2) 小倉謙 (1944) 植物形態学. 654pp, 養賢堂, 東京.
- (3) 林拙郎・高橋洋子(1997) : 樹形のモデル化についてースギ・ヒノキの場合ー 日林誌 79 (4), 222-228, 1997
- (4) 中前栄八郎・西田友是 (1991) 3次元コンピュータグラフィックス. 211pp, 昭晃堂、東京.
- (5) 鈴木悌司・大崎恵一・佐藤創・山本寧 (1992) 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 : 504-508.
- (6) 鈴木悌司他 (1995) 景観シミュレーションによる緑環境計画に関する研究. 平成6年度共同研究報告書、北海道立林業試験場・北海道立工業試験場・北海道立寒地住宅都市研究所 : 1-81.
- (7) 竹下敬司 (1985) パラボラ樹冠形モデルによるスギ林の構造解析. 九州大学農学部演習林報告 55 : 55-104.