モミ樹冠における枝形成と光要因の相互依存関係(1)

誌名	静岡大学農学部演習林報告 = Bulletin of the Shizuoka University Forests
ISSN	03899489
著者名	久保田,光政 角張,嘉孝
発行元	静岡大学農学部附属演習林
巻/号	19号
掲載ページ	p. 11-32
発行年月	1995年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

静岡大学農学部演習林報告　第19号，pp. 11～32　(1995)

モミ樹冠における枝形成と光要因の相互依存関係（Ⅰ）測定法および樹冠構成要素の解析について

久保田光政[1)]・角張　嘉孝[2)]

Computer Simulation of Crown Development of *Abies firma* Sieb. et Zucc. based on the Relationship between light conditions and shoot growth (Ⅰ)
– An Analysis of Construct a Theory and Describing of Field Work –

Mitumasa KUBOTA and Yoshitaka KAKUBARI

Summary

The crown development of Momi (*Abies firma* Sieb. et Zucc.) was affected by the light conditions caused by comptitions among trees in a forest and selfshading of a tree crown. Crown developments of single tree and community level were analyzed by using computer simulation model which was influenced by the variation of parameter of some factors based on the relationship between light conditions and shoot growth.

1. Steel tower was built up sorrunding the sample tree in order to measure shoot growth and light conditions. This tower reaches the top of crown of sample tree.

Light measuring system consisting 16 sencers was used for the light measurement at different positions in the crown. The diurnal change of relative light intensity was calculated at the same time comparing the results from 15 sencers at different points of crown and that of 1 sensor above the top of crown. Measurments were carried out from 90 points in crown at two different times (Sep–Oct 1990 and Sep–Oct 1991, respectively).

2. Momi's shoot put out in April only one time during growing season and the winter buds which become shoot on base shoots at next vegetation season. According to this repition, crown grow up. Shoots were difined in stem and branch, and the 1 unit of shoots composed with base shoot and shoot that separated from it. There are three kinds of shoots in difference of separate point on the base shoot and degree. 1200 shoot's lengths were measured. Separate point on the base shoot, separate degree, degree of inclination and existence of leaves were masaured. Each shoots were numbered and sorted with own address.

3. An analysis of crown development by simulation model was carried out based on measured values during 5–year. Crown development within a crown were shown in three dimensional description by using computer graphics in presented with process. Comparing total calculated shoot length and measured one were almost same, and the results of simulation shall be satisfied. Decreasing of relative light intensity in stand level was showed in three dimensional description.

1) ダイトウグリーン株式会社緑化資材開発部
Division of Revegetation Material and Development, Daitougreen CO.,LTD.,Tenko Bldg. 1-2-3 Haramachida, Machida 194, Japan

2) 静岡大学農学部森林資源環境学講座造林学分野
Division of Forest Resources and Environmental Conservation, Department of Forest Resources Science, Faculty of Agric., Univ. of Shizuoka, Ohya 836, Shizuoka 422, Japan

As shown in above descriptions by using simulation model, it will be very useful in administration of multi-estiried forest and estimate of tree growth with conplicated light condition.

キーワード：モミ、樹冠発達、光条件、シュートグロース、シミュレーション
Keyword: *Abies firma,* crown development, light condition, shoot growth, simulation

I はじめに

複層林や天然林は林分構造が複雑でかつ成長過程が長期間にわたるため、密度管理や収穫予測が困難である。また公園緑化において、限られたスペースに植栽された樹木の経年変化の予測が必要とされている。それらを予測するため最も重要な環境要因である光要因と各樹木との関係を明らかにしなければならない。これは、光要因が枝条の展開に働きかける「作用action」と、枝条の展開によって起こる日陰形成などの「逆作用reaction」の相互依存関係である（黒岩：1979）。

従来、樹冠の構造や成長に関する研究は生産構造図による解析が行われてきた（MONSIU SAEKI：1953）。この方法では測定時点における枝条と光要因との相互依存関係は解るが、時間軸に沿った相互依存関係の変化を予測をすることができない。そこで、時間軸に沿った樹冠の形態・光条件を予測するためには、樹冠を構成している全ての枝条（1年単位）の位置と履歴を測定記録し、同時にそれぞれの枝条の光条件を測定をしなければならないが、技術的に難しくまたデータ数が膨大なため、要因の相互依存関係を解析することが困難である。したがって樹冠の成長過程を予測するために、自然状態の林内の光条件と枝条生長との関係に基づいて樹冠の発達をシミュレーションした例はほとんどない。

最近のマイクロコンピュータ進歩は、大量のデータの測定や処理を可能にした。測定装置としては、光環境測定システム（角張ら：1990）がある。多測点を同時に連続して3次元的に測定できる。

本研究では24年生のモミを供試木とし、樹冠を構成している枝条単位（枝条が出芽する際に基部にできる節で区切る）の長さや分岐角度などの成長過程を測定記録、同時に光環境測定システムを使用して樹冠各所の光条件を連続的に測定した。それらの実測値に基づいて光条件と樹冠構成の基本単位である枝条との相互依存関係を解析し、光条件と樹冠成長のシミュレーションモデルを作成し、樹冠成長の予測を試みた。

II 試験地の概況

1．環境

試験地は静岡市内の日本平西側斜面下部にある、静岡大学キャンパス内の生態実験林である。標高は80m、傾斜角度5度の南向き斜面である。

年平均気温は16.1度、年降水量は2,360mm、暖かさの指数は132℃である。

地質は中央日本西帯、第四紀小鹿礫層に属している（槙山　他 1975）。土壌は、礫を含む適潤性褐色森林土で、A層の厚さは30cmで腐植を含んでいる。

2．林分状況

試験地は24年生のモミ林である。立木密度は1,600本／ha、平均胸高直径は12.4cm、平均樹高は6.4mである。供試木は、胸高直径13.2cmで、樹高6.8mのモミの優勢木である。

III 調査方法

1．測定用鉄塔

図－1に示すように、供試木を取り囲む鉄パイプ製の測定用鉄塔を建てた。測定用鉄塔の利用によって、すべての場所の枝条および光条件を測定できる。

2．樹冠各部の区別方法と名称

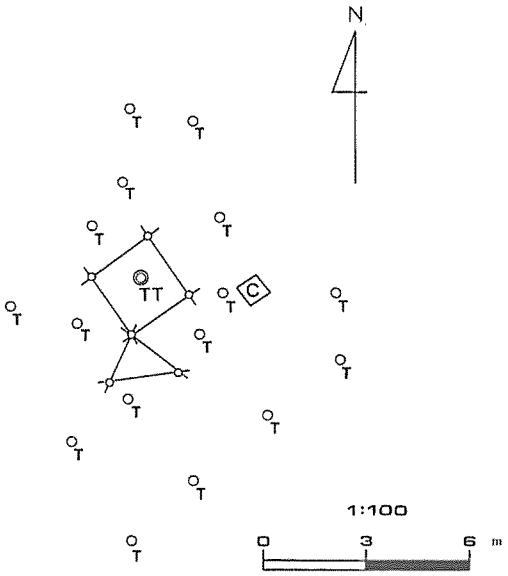
一般的に樹木の地上部分を枝条系と呼び、大きく本幹・支幹・枝と区分する（初島：1976）。梢から地上までの部分を本幹（Trunk)。支幹（Limb)は幹から分かれた太い枝または樹幹の重みを支え樹幹を助けるもの。枝（Branch)は支幹または本幹から分かれた小さい枝のすべてをいい、小枝とシュートの2つに細分される。小枝（Branchlets, twigs)は枝から分かれたもので、伸長成長が止まっている部分。シュート（Shoots)とは成長を続けつつある当年枝を指す。枝条の伸

長成長は展開をしたその年で止まるが肥大成長は続き、梢の先に展開したシュートは本幹となり、本幹から出たシュートは支幹となる。

3．枝条の測定

前年枝（2年枝）の先端部分、あるいは途中部分で形成された冬芽は4月中旬に展開し当年枝となり、5月下旬までに伸長成長を終える。展開は1年に1回である。また翌年にシュートになる冬芽は8月中旬から当年枝に付く。針葉は当年枝の展開と同時に、当年枝の先端から下端まで全面に密生する。針葉は3～5年で枝条から落葉する。

当年枝（シュート）が分岐展開した場所には節が残る。したがって枝条が一直線に伸長していても当年枝と前年枝（2年枝）を区別することが出来る。また分岐箇所の節は永年的に残るため、当年枝と前年枝の区別だけではなく前々年枝（3年枝）さらにその前年と10年以上さかのぼって枝条の年令が区別できるので、それぞれの枝条の位置・長さを測定できる。また枝条が枯れた後も数年間は落枝しないので成長の過程を把握しやすい。



TT：試験木
C：光環境測定用コンピュータ
T：周辺木

図－1　観測用鉄塔、試験木の位置

そこで本研究では7年前までの枝条（本幹・支幹・枝・小枝・シュート）を節間単位に区切って測定をした。

3．1．枝条の分類

1）本幹から出ていない枝条

モミの分岐型を調べたところ、当年枝（シュート）を展開させるのは展開から1年経過した1年枝だけであることがわかった。展開したシュートとその元枝となる枝条の関係のみで分岐型が解析できる。そこで元枝とそこから出ている枝条を「枝条ユニット」と呼ぶ。枝条は元枝上の付いている位置や元枝から分岐している方向によって、図－2に示すように3種類に区分できる。

a）頂枝……元枝の先端の中心に、元枝と同じ方向を向いて付いている枝条。

b）亜頂枝…元枝の先端に、元枝と異なる方向を向いて付いている枝条

c）側枝……元枝の先端以外に付いている枝条。分岐の方向は元枝と異なる場合と同じ場合がある。

2）本幹から出ている枝条

図－3に示すように本幹の部分も下記のように3種類に区分した。

a）頂枝……本幹。

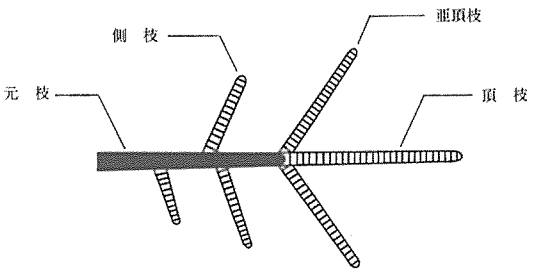
b）亜頂枝…元枝（本幹）の先端から出ている支幹。

c）側枝……元枝（本幹）の先端以外に付いている支幹。

3．2．番号の付け方

1）本幹から出ている枝条

本幹を節間単位で分ける。根元から、1A・2A・3A・・・21A・22Aと番号を付



図－2　枝条分岐の模式図

ける（図－４）。番号は樹齢を表し、「Ａ」は頂枝であることを表している。23年目に枝条番号22Ａ（本幹）から梢として展開するシュートは23Ａとなる。同様に24年目の梢は24Ａとなる。つぎに23年目に枝条番号22Ａから支幹として展開するシュートは同時期に展開している本幹23Ａに続けて、上部に位置する枝条から23Ｂ・23Ｃ・23Ｄ・23Ｅ・23Ｆ・23Ｇ・23Ｈ・・・・とする。また同じ位置に複数の枝条が展開している場合は、もっとも南側の枝条から時計回りにＢ・Ｃ・Ｄ・Ｅ・Ｆ・・・と記録する。このアルファベット記号だけでは亜頂枝と側枝を区分できないが、枝条が元枝の下部からどのくらい離れた位置に展開しているかを表す別項目の「分岐位置」を利用して判断をする。

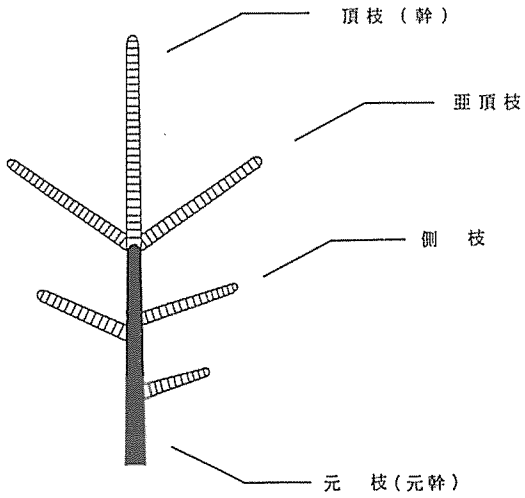
２）本幹から出ていない枝条

枝条番号23Ｂを元枝として24年目に展開するシュートは、元枝の先端についているものから元枝番号にＡ・Ｂ・Ｃ・Ｄ・・のアルファベット記号をつけて、23ＢＡ・23ＢＢ・23ＢＣ・23ＢＤ・23ＢＥ・23ＢＦ・・・という枝条番号になる（図－５）。この記号だけでは頂枝・亜頂枝・側枝の区別がつかないが、別項目の「分岐位置」と「分岐角度」を加味して区別する。例えば分岐位置が元枝の先端部かつ分岐角度が０度前後の枝条は頂枝となる。分岐位置は先端部であるが分岐角度が０度前後以外の枝条は亜頂枝となる。分岐位置が先端部以外の枝条は側枝となる。ただし、亜頂枝のように分岐位置が同じ場合は時計回りでアルファベット記号をつける。

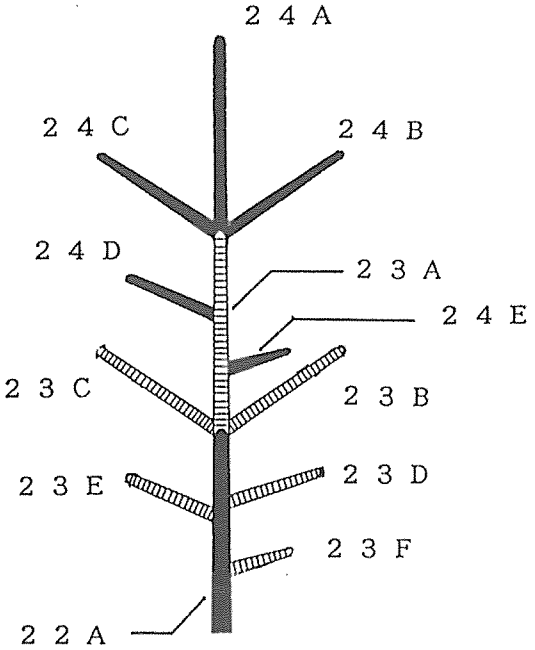
同様に枝条番号23ＢＡを元枝として、25年目に展開するシュートは元枝の先端から23ＢＡＡ（頂枝）・23ＢＡＢ（亜頂枝）・23ＢＡＣ（亜頂枝）・23ＢＡＤ（側枝）・23ＢＡＥ（側枝）となる。

３．３．長さの測定

枝条の長さは先端の節から下端の節までの距離である。物差しを使用して１㎜単位で測定した。測定については、予備測定を1990年６月～８月、本測定をシュートの伸長成長の終わった12月～２月に行なった。測定した枝条数は当年枝～７年枝までで総数1,200本である。



図－３　本幹分岐の模式図



図－４　本幹の番号の付け方

3．4．分岐位置の測定

各枝条の種類（Ⅲ．3．1．参照）と枝条が元枝のどの位置に生えているかを決定するため、分岐位置を測定した。物差しを使用し、元枝下端の節と各枝条の分岐点の長さを1㎜単位で測定した。測定した分岐位置の数は1,200カ所である。

3．5．分岐角度の測定

枝条の先端部分の方位をオイルコンパスを用いて1度単位で測量した。その値と元枝の方位を利用して、元枝からの分岐角度を算出した（図－6）。ここで使用したオイルコンパスは枝条測量用に、コンパスの底面にアクリル製のガイド板を取り付け、枝条に沿わせ易く改造されたものである。測定した枝条の数は4年枝までで総数600本である（本幹及び支幹については、7年枝まで測定した）。

3．6．傾斜角度の測定

枝条測定用に改造した傾斜角度測定器を使い、枝条の下部にあてがう形で水平面に対する傾斜角度を1度単位で測定した（図－7）。測定した枝条の数は5年枝までで総数730本である（本幹及び支幹については、7年枝まで測定した）。

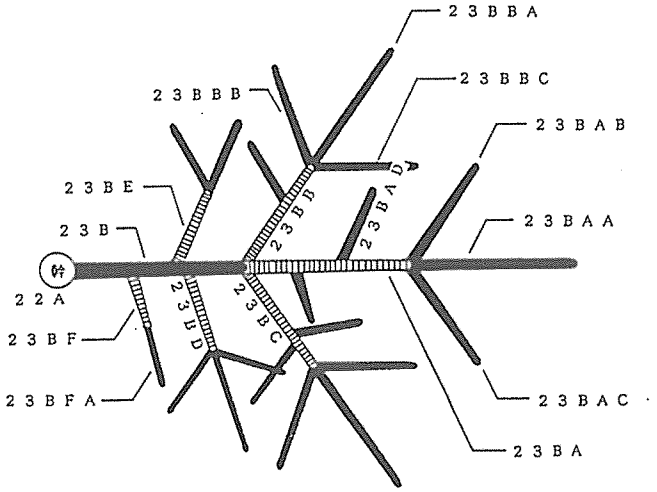
3．7．針葉の葉面積測定

枝条に付く針葉の葉面積合計については、枝条からすべての針葉をはずし葉面積測定機器（AAM-7　林電工社製）を使用して測定した。測定した枝条は、17㎜～270㎜の陽葉枝21本と、29㎜～102㎜の陰葉枝18本である。

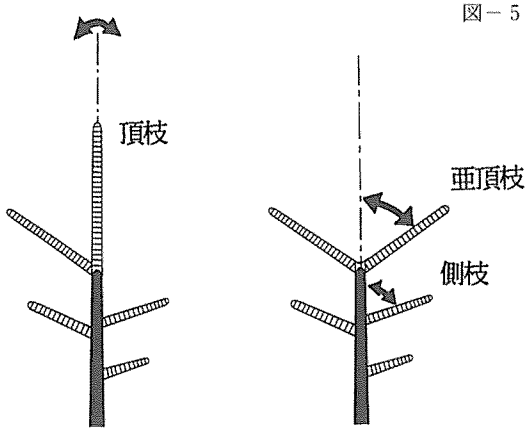
4．樹冠部の光の測定

4．1．測定機器

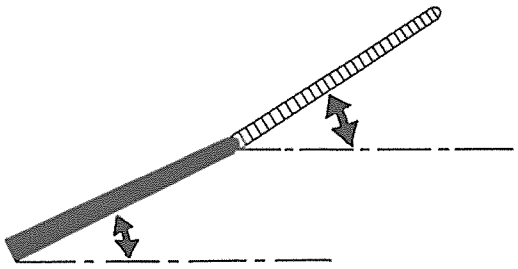
樹冠部の光の測定には、光環境測定システムを使用した。この装置は16個（最大48チャンネル）の光量子束密度センサ（IKS-25：小糸工業社製）、16チャンネルA／D変換器、計測シーケンスおよびデータ計測用のラップトップコンピュータで構成されている。この



図－5　枝条の番号の付け方



図－6　枝条分岐角度の模式図



図－7　枝条傾斜角度の模式図

装置は計測間隔が10秒毎の場合、16チャンネルの光量子束密度のデータを4日間連続してフロッピーディスクに記録できる。

16個のセンサーのうち1個を林外に設置し、樹冠内の異なる15カ所の光量子束密度を、相対値を用いて表現している。

4．2．測定方法

樹冠内の任意の場所にアルミアングル製の設置台を作り光量子束密度センサーを設置した。

相対照度は、図－8に示したように樹冠の外側から内部へ、上部から下部へ測定し、全部で76カ所の光量子束密度を測定した。

1990年9月～10月と1991年9月～10月の2回のべ60日間測定を行った。

Ⅳ　枝条形成の構成要素とその類型化

1．1本の元枝から展開する枝条の伸長量

光条件が枝条ユニットの頂枝・亜頂枝・側枝の伸長に影響を及ぼすのは展開後ではなく、前年の展開前の冬芽が形成される前後と考えて、元枝が冬芽を形成する前後の光条件によって元枝を分類し、3段階に区分して相対照度ごとに関係を調べた。枝条ユニット内の頂枝・亜頂枝・側枝の長さをすべて加算した合計長が元枝の長さに比例しており（図－9）、さらに元枝長が同じ場合、合計長が光条件に比例して長くなることがわかった。

相対照度が0％～40％の場合は枝条の合計長が明らかに減少する。あるいは枝条を全く出さない場合がある。相対照度が80％～100％の場合は、枝条の合計長が100％のときとほぼ同である。40％～80％の場合は両者の中間となる。

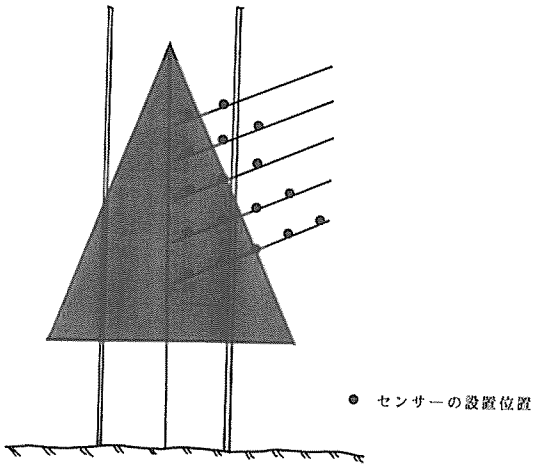
相対照度は10月の晴天日に測定した1日の平均相対照度を使用した。下記の関係式が示すように、それぞれの相対照度の区分ごとに、元枝長とそこから出る枝条の合計長との間には高い相関関係がある。相関係数は相対照度が低い方から順番に0.61、0.78、0.92であった。

TBL=1.32×BB-40.6(相対照度0％～40％)

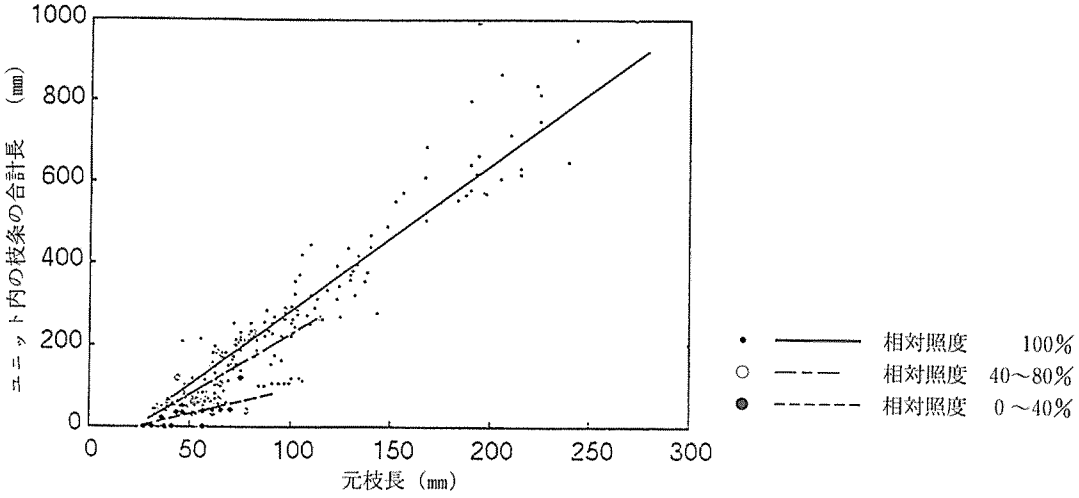
TBL=2.88×BB-70.0(相対照度40％～80％)

TBL=3.57×BB-80.0(相対照度80％～100％)

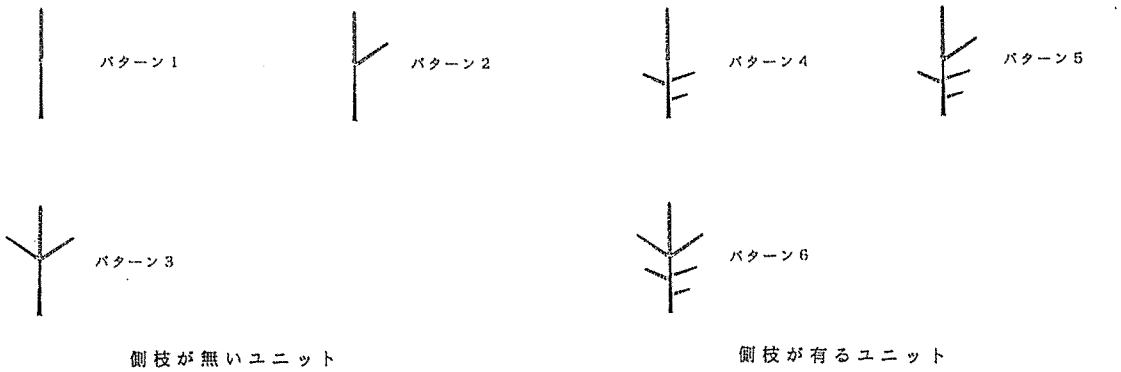
TBL:枝条の合計長　　BB:元枝長



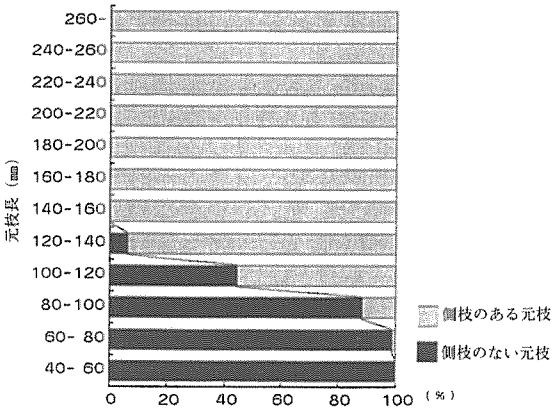
図－8　枝層ごとのセンサーの設置位置



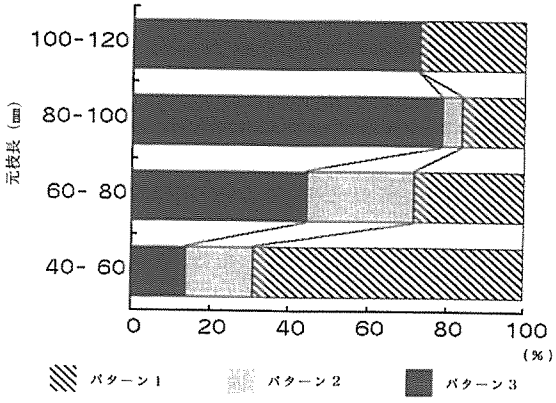
図－9　相対照度の異なる所の元枝長と枝条合計長の関係



図－10　分岐型のパターン分類



図－11　元枝長と側枝の有無の関係



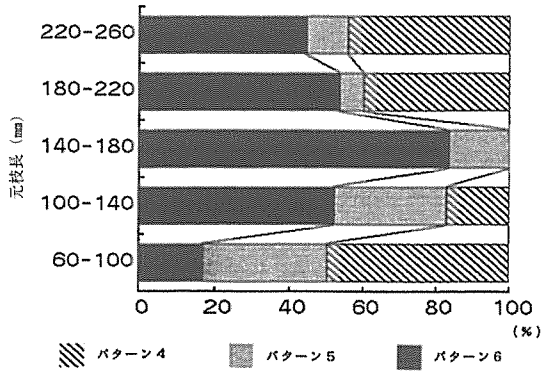
図－12　元枝長と分岐型の関係（側枝無し）

2．枝条の分岐型

枝条ユニットごとに枝条の分岐型パターンを分類したところ図－10に示すように、分岐型が下記の通り6パターンあることが解った。

パターン1：側枝無し、頂枝が1本
パターン2：側枝無し、頂枝が1本、亜頂枝が1本
パターン3：側枝無し、頂枝が1本、亜頂枝が2本
パターン4：側枝有り、頂枝が1本
パターン5：側枝有り、頂枝が1本、亜頂枝が1本
パターン6：側枝有り、頂枝が1本、亜頂枝が2本

これらの分岐型が出現する原因となる要因の洗い出しを行い。さらにその要因と分岐型



図－13　元枝長と分岐型の関係（側枝有り）

の出現割合や成長量との関係について解析した。

2．1．側枝の有無

元枝長を20㎜ごとの階級に分けて、各階級内の側枝のある元枝と側枝の無い元枝の本数割合を調べた（図－11）。元枝長が60㎜より長くなると側枝が付きはじめ、元枝が長くなるにしたがい出現の割合が増える。また140㎜以上の元枝には常に側枝が付く傾向がある。ここで側枝の有無が元枝長の長さによって決まることが解った。したがって元枝長140㎜以上の場合には分岐型はパターン4～パターン6になる。元枝長が60㎜未満の場合にはパターン1～パターン3しか出現しない。元枝長が60㎜以上140㎜未満の場合には全てのパターンが現れる可能性がある。

2．2．側枝無し分岐型の出現率

側枝がない分岐型のパターン1からパターン3におけるそれぞれの出現割合について、図－12に示すように元枝長を20㎜ごとの階級に分けてそれぞれの階級内で調べた。元枝長が40～60㎜の場合、シュートを展開する力が弱いためか頂枝が1本だけのパターン1の出現率が68％である。元枝が長くなるにしたがいパターン3の出現の割合が増し、パターン1の出現の割合が減ることがわかった。またパターン2は元枝長が100㎜以下の場合しか出現しない。

2．3．側枝有り分岐型の出現率

側枝が有る分岐型パターン4からパターン6についても、側枝無しの場合と同じようにそれぞれの出現割合を図－13に示すように、元枝長を40㎜ごとの階級に分けてそれぞれの階級内で解析した。側枝有りの元枝長は側枝無しの時よりも長いため、それぞれの階級幅を20㎜から40㎜に拡大した。元枝長が180㎜未満では元枝が長くなるにしたがい、頂枝1本だけのパターン4の出現率が減り、パターン6が増える。しかし元枝長が180㎜以上では逆に頂枝1本だけのパターン4の出現割合が増すことが解った。

2．4．側枝の分岐様式

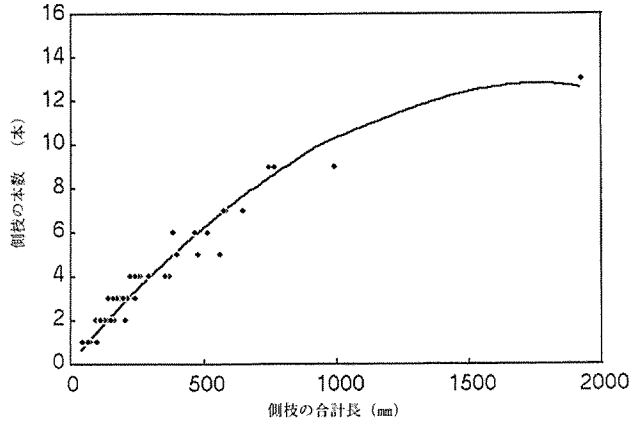
分岐型パターン4からパターン6において、元枝に付く側枝の分岐様式は頂枝や亜頂枝の場合と異なり、分岐位置や元枝1本あたりに付く本数が様々である。そこで下記のような2つの関係を組み合わせて、側枝の分岐方法を解析した。

1）側枝の合計長と側枝の本数の関係

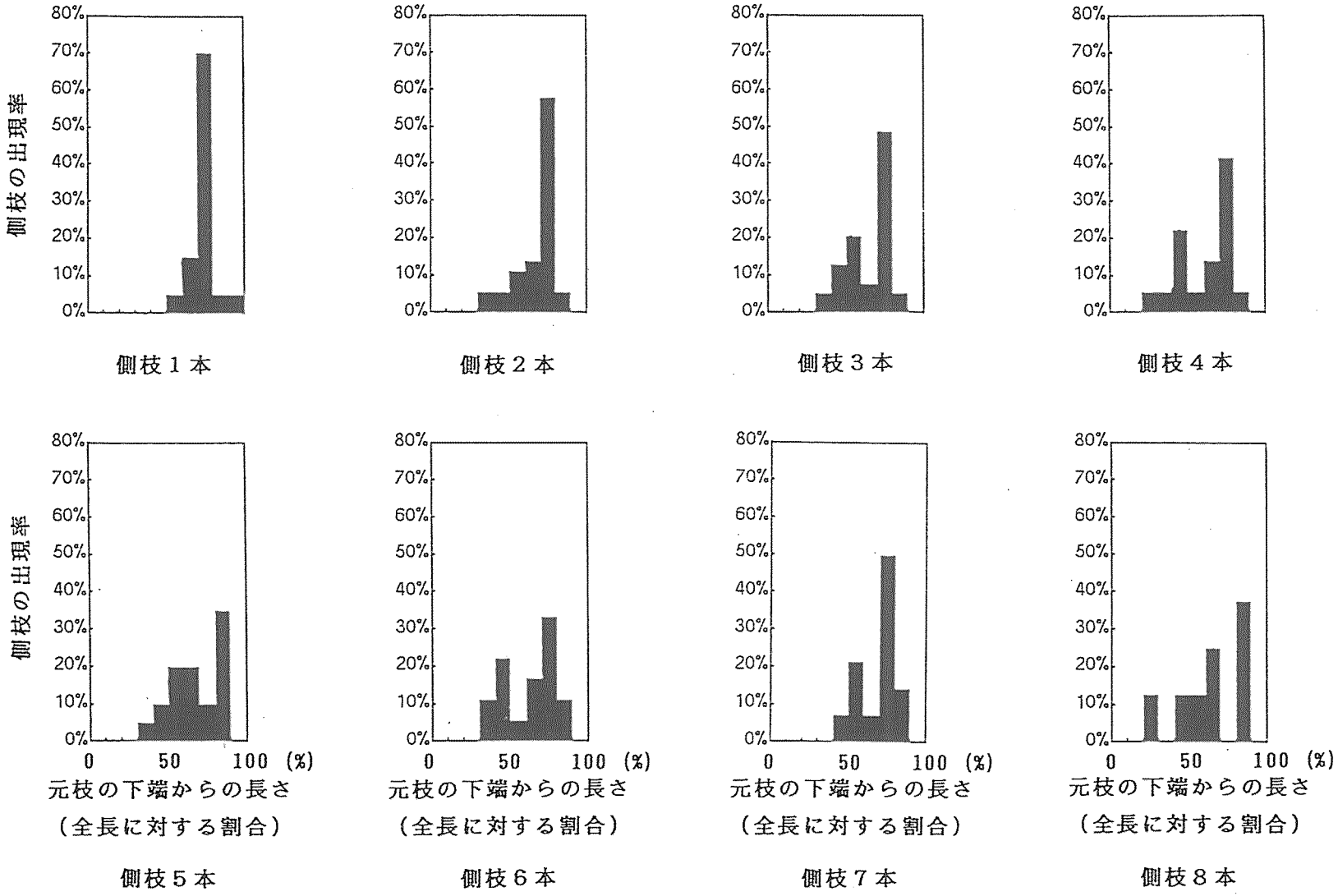
図－14に示したように、元枝1本に付いている側枝の合計長と側枝の本数との間には2次の相関関係があり、相関係数は0.94である。側枝の合計長が増すにしたがい側枝の本数が増えることがわかった。

2）側枝の本数と分岐位置の関係

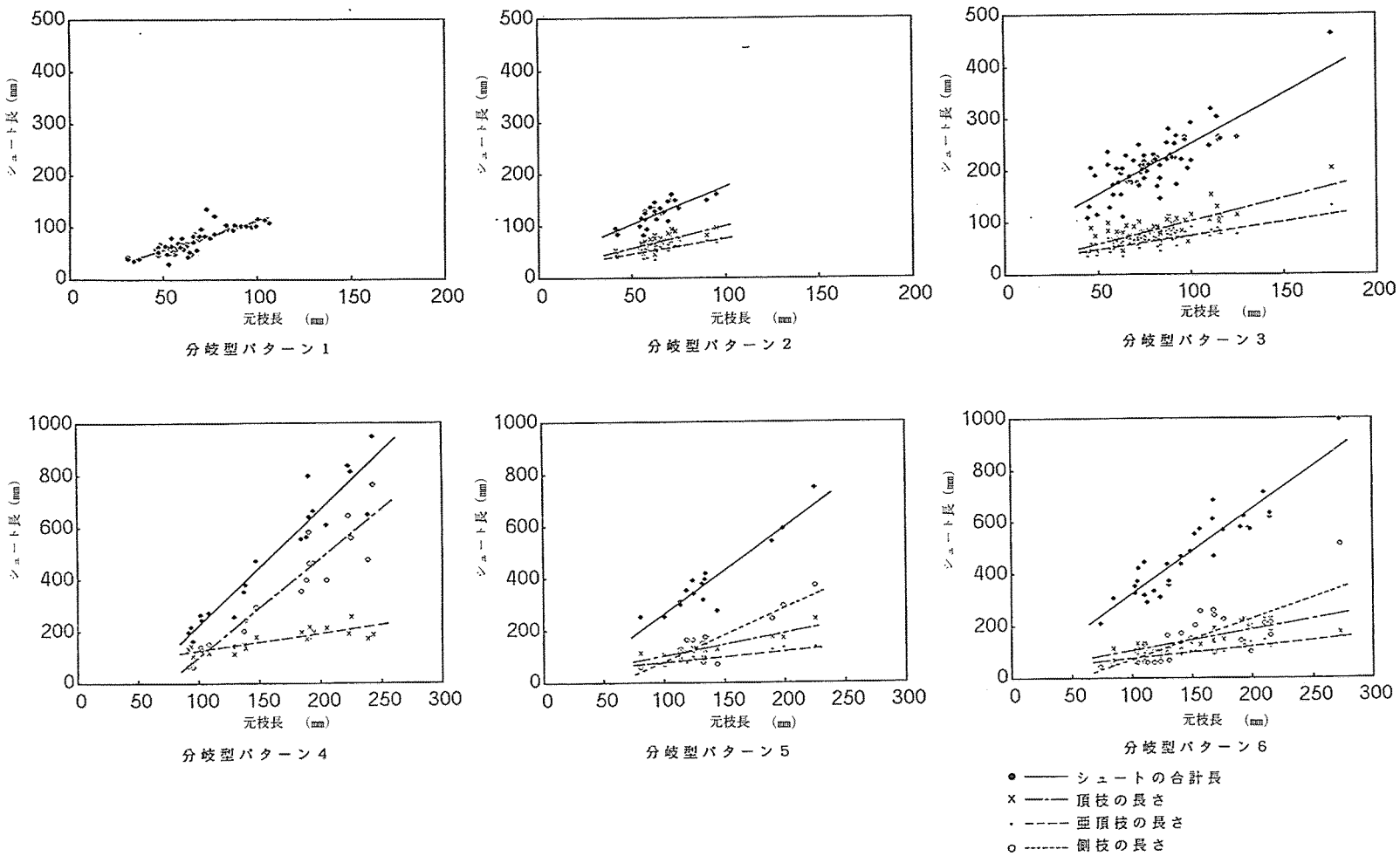
側枝の本数によって側枝の分岐位置が変わる傾向がある。グラフの横軸は元枝上での分岐位置をあらわしており、元枝を20等分している。左端（0％）が元枝の下端部分そして右端（100％）が先端部分の位置である（図－15）。縦軸は側枝の出現率を表している。側枝の本数が少ないときは、分岐位置が先端部に近いところに集中し、側枝の本数が増すにしたがい分岐位置が全体に分散する。ここ



図－14　側枝の合計長と側の本数の関係


側枝の出現率
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
側枝１本
側枝２本
側枝３本
側枝４本
0
50
100 (%)
元枝の下端からの長さ
（全長に対する割合）
側枝５本
側枝６本
側枝７本
側枝８本

図－15　側枝の出現率



図－16　分岐型パターンごとの元枝長とシュート長の関係

で側枝が７本の場合に分散していないのは、データ数が少ないことが原因と思われる。

３．枝条１本あたりの伸長量の解析

それぞれの枝条ユニット内で元枝長とそこから出ている枝条の間に比例関係があり、元枝長が同じならばそこから出ている枝条の合計長も等しくなる（Ⅳ．１．参照）。また分岐型の解析から元枝長が同じ場合でも、そこに付く枝条数はパターンによって変わる（Ⅳ．２．参照）ことが解った。そこで図－16に示すように分岐型のパターン別に、元枝長とその元枝に付く頂枝・亜頂枝・側枝それぞれの伸長量の関係を調べた。

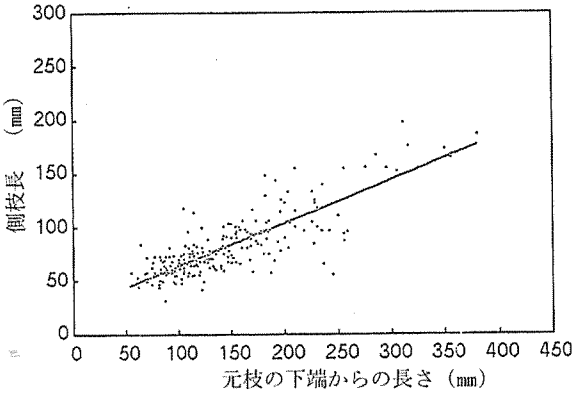
３．１．頂枝の伸長量

分岐型パターン１～パターン６全てにおいて、元枝長と頂枝の伸長量の間に１次の相関関係が認められた。以下に各分岐型の近似式と相関係数を記す。

パターン1：S＝1.13×BS-1.1　0.84
パターン2：S＝0.86×BS＋14.0　0.71
パターン3：S＝0.86×BS＋14.9　0.79
パターン4：S＝0.64×BS＋59.9　0.82
パターン5：S＝0.88×BS＋15.8　0.91
パターン6：S＝0.80×BS＋23.6　0.84
BS：元枝長　S：頂枝の伸長量

３．２．亜頂枝の伸長量

亜頂枝が付く分岐型のパターン２・３・５・６において、元枝長と亜頂枝の伸長量が比例関係にあり、１次の相関関係が認められた。以下に各分岐型の近似式と相関係数を記す。



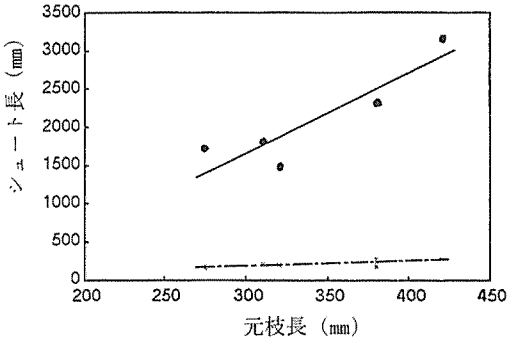
図－17　分枝位置（下端からの長さ）と側枝長の関係

パターン2：S＝0.58×BS＋16.2　0.68
パターン3：S＝0.53×BS＋21.0　0.80
パターン5：S＝0.45×BS＋33.5　0.91
パターン6：S＝0.45×BS＋29.6　0.88
BS：元枝長　S：亜頂枝の伸長量

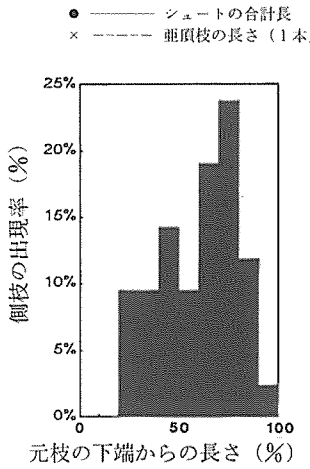
パターン１とパターン４は亜頂枝が存在しない。

３．３．側枝の伸長量

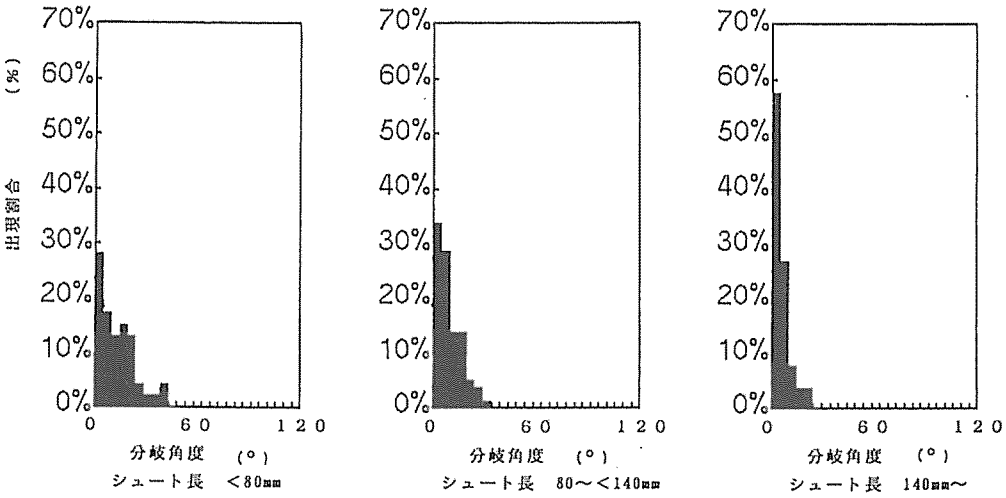
側枝の伸長量は元枝長に関係なく元枝上の分岐位置（下端からの距離）と相関関係にあり、相関係数は0.75である（図－17）。側枝の分岐位置が元枝の下端から上端部になるにしたがい、そこから出る側枝は長くなる。これは頂芽優勢の法則によるものと考えられる。



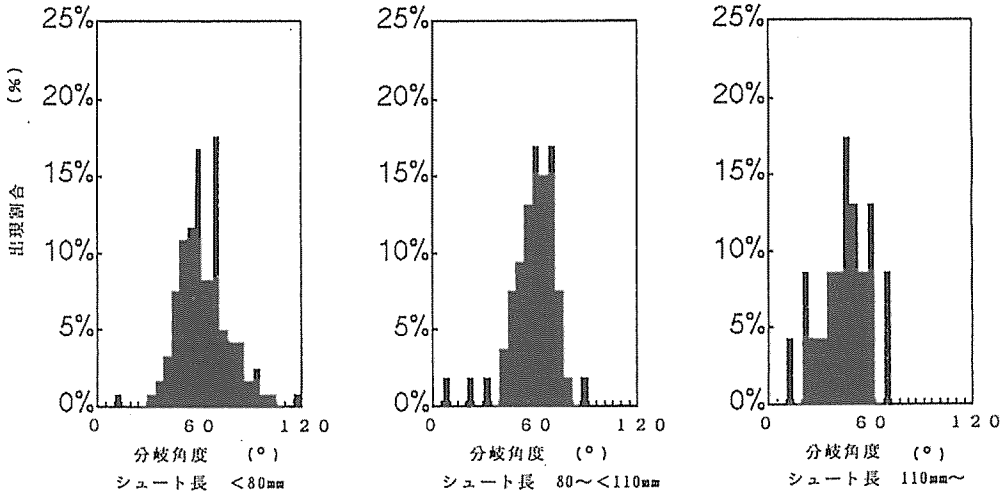
図－18　元枝長とシュート長の関係（本幹）



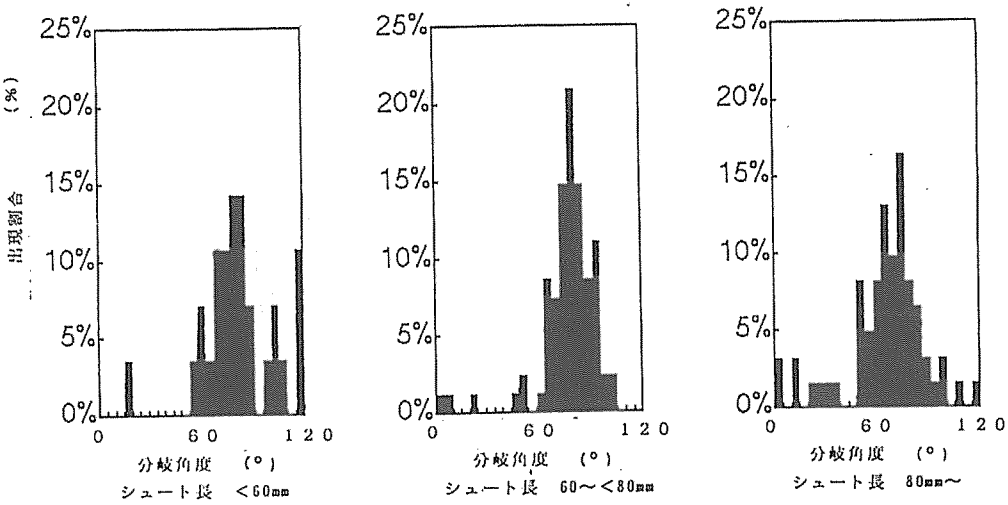
図－19　側枝の分岐位置と出現割合の関係



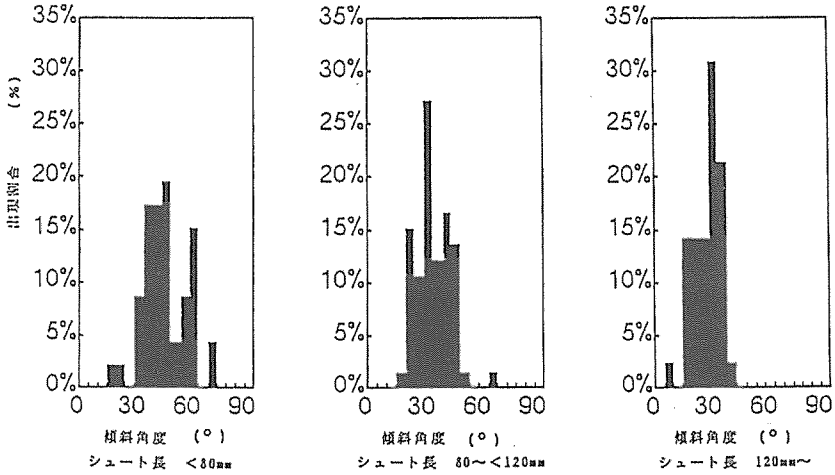
図－20　頂枝の分岐角度の度数分布



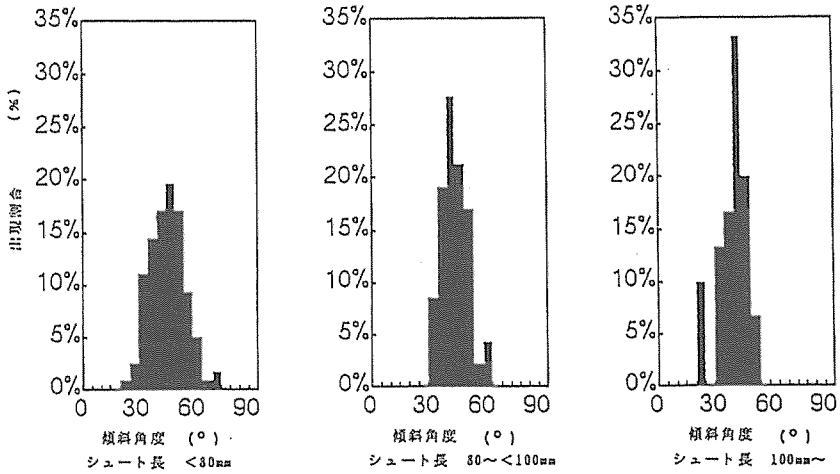
図－21　亜頂枝の分岐角度の度数分布



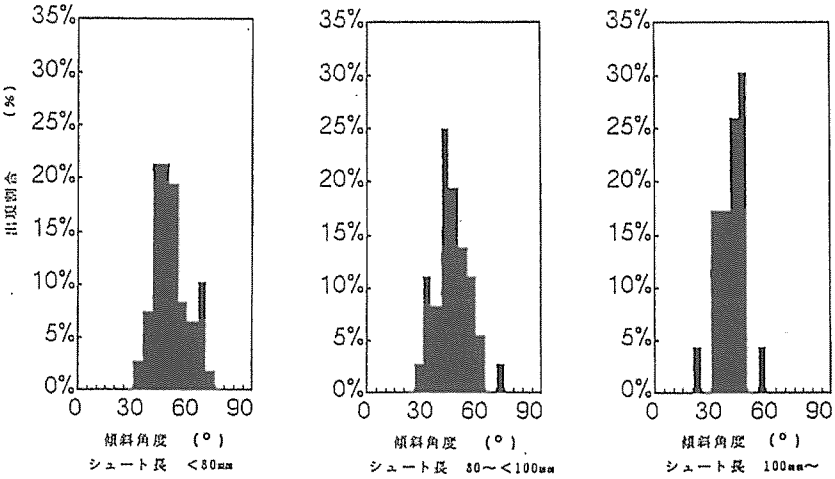
図－22　側枝の分岐角度の度数分布



図－23　頂枝の傾斜角度の度数分布



図－24　亜頂枝の傾斜角度の度数分布



図－25　側枝の傾斜角度の度数分布

4．本幹から出る枝条の伸長量と分岐パターン

4．1．本幹から出る頂枝・亜頂枝

本幹についてもほかの枝条と同様に枝条ユニットごとに、元枝長とそこから出ている枝条の合計長には1次の相関関係があり、元枝（本幹）が長くなるにしたがい枝条の合計長は増加する（図－18）。また元枝長と亜頂枝の長さの間にも1次の相関関係があり、元枝が長くなるにしたがい亜頂枝の長さは増加する。

しかし元枝長と頂枝（幹）長との間に相関関係はない。頂枝の長さは元枝長に関係なく、275㎜～420㎜の範囲の中の任意の値であった。頂枝の長さを決める要因は節間で区切った1年分の元枝だけでなく、ほかに要因があると考えられる。

4．2．本幹から出る側枝

側枝の本数と側枝の合計長の間には、2次の相関関係がある（図－14）。この関係式は本幹以外の枝条の場合と同じである。

側枝の分岐位置と側枝の出現率の関係を図－19に示す。グラフの横軸を元枝（本幹）上での分岐位置にあわせて左端が0％、右端が100％となるように5％づつに区分している。縦軸は側枝の出現率を表している。側枝の分岐位置は、先端部に近いところに比較的集中している。

側枝の伸長量は本幹以外の枝条の場合と同じで、元枝長（本幹長）に関係なく元枝上の分岐位置（下端の節からの距離）と相関関係にある（図－17）。

5．枝条の分岐角度

図－6に示すように、枝条の分岐角度の系列を枝条が元枝のどの位置で分岐しているかによって、頂枝の分岐角度、亜頂枝の分岐角度、側枝の分岐角度の3種類に分けた。それぞれの枝条の分岐角度の度数分布は枝条自体の長さによって変化する傾向がある。そこで、枝条自体の長さによって度数分布を3つに分け、それぞれの場合について分岐角度の解析を行った。

5．1．頂枝の分岐角度

頂枝では図－20に示すように、分岐角度の系列を長さに基づいて0㎜～80㎜、80㎜～140㎜、140㎜～の3つに分けた。5度づつに区分された分岐角度と出現割合との関係を解析した。

枝条自体の長さが増すにしたがい分岐角度の小さい枝条の割合が増える。140㎜以上の場合には分岐角度0～5度の1カ所に57％の枝条が集中し、分散値が小さくなる。

5．2．亜頂枝の分岐角度

亜頂枝では図－21に示すように、分岐角度の系列を枝条自体の長さで0㎜～80㎜、80㎜～110㎜、110㎜～の3つに分けた。5度づつ区分された分岐角度と出現割合との関係を解析した。

枝条自体の長さが大きくなると、それにともない分岐角度の平均値が65度、60度、47度と鋭角になる。しかし頂枝のように1つの角度に集中することはなく、出現割合の最も大きい相対度数値が18％程度である。また3つの系列とも分散値は同じで、ばらつきの大きさは枝条自体の長さに関係ないことが解る。

5．3．側枝の分岐角度

側枝では図－22に示すように、分岐角度の系列を長さに基づいて0㎜～60㎜、60㎜～80㎜、80㎜～の3つに分けた。5度づつに区分された分岐角度と出現割合との関係を解析した。

枝条長が大きくなるにしたがい、分岐角度の平均の値が86度、79度、68度と減少する。また枝条長が60㎜～80㎜の度数分布は、枝条長が0㎜～60㎜のものと比較して分散値が小さくなり、ばらつきが小さくなる。枝条長が80㎜以上では、75度と0度～30度を中心とする分布の2つに分離する。0度～30度に分布する側枝は、元枝に重なる形で生えていることが多い。

6．枝条の傾斜角度

傾斜角度の系列を枝条の元枝上の分岐位置によって、頂枝の傾斜角度、亜頂枝の傾斜角度、側枝の傾斜角度の3つの系列に分けた。傾斜角度の度数分布は枝条自体の長さによって変化する傾向がある。そこで枝条自体の長さをもとにそれぞれの系列を3つに分類して、傾斜角度の解析を行った。

6．1．頂枝の傾斜角度

図－23に示したように、頂枝をそれの長さに基づいて0㎜～80㎜、80㎜～120㎜、120㎜～の3つの度数分布に分けた。5度づつに区分された傾斜角度と枝条の出現割合との関係を解析した。

頂枝自体の長さが大きくなるにしたがい、傾斜角度の平均値が46度、34度、28度と緩くなる。また分散値も小さくなり、ばらつきが小さくなる。

6．2．亜頂枝の傾斜角度

亜頂枝では図－24に示したように、亜頂枝自体の長さによって0㎜～80㎜、80㎜～100㎜、100㎜～の3つに分けた。そして5度づつに区分された傾斜角度と枝条の出現割合との関係を解析した。

亜頂枝長が大きくなるにしたがい、傾斜角度の平均の値が45度、44度、40度と小さくなる。また分散値も小さくなり、光度が高くなる傾向がある。

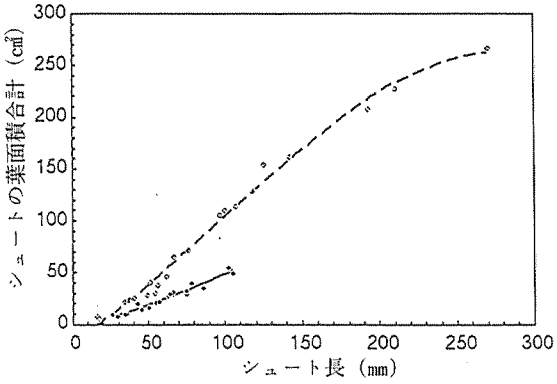
6．3．側枝の傾斜角度

側枝も頂枝や亜頂枝と同様に図－25に示したように、側枝の長さを基に0㎜～80㎜・80㎜～100㎜・100㎜～の3つに分けた。そして5度づつに区分された傾斜角度と出現割合との関係を解析した。

頂枝や亜頂枝の場合と同じ傾向で、側枝長が大きくなるにしたがい傾斜角度の平均の値が50、45度、40度と緩くなる。また分散値が小さくなりなり、光度が高くなる傾向がある。

7．針葉の葉面積

図－26に示したように、シュート長とそこに付く葉面積合計値との間に相関関係があることが解った。この関係を利用すれば、生産力に寄与する葉量を枝条の測定だけで推定できる。



図－26　シュート長と葉面積合計の関係

○ ---- 陽葉
● ——— 陰葉

8．林内の光条件の解析

晴天日に、樹冠内の各測点に設置した光量子束密度センサーで測定を行った。縦方向には本幹の節部から出ている支幹にかぶせる形（図－8参照）で、下部から上部へと（18年目の支幹・19年目の支幹・・・・24年目の支幹）順番に各枝層に設置した。横方向には幹から15㎝離れた所にセンサーを設置し、30㎝づつ離して支幹の先端部まで設置した。それぞれのセンサーから得られたデータを元に相対照度の日変化と測定位置の関係がわかるように図化した（図－27）。それぞれのグラフの縦軸は相対照度、横軸は時間（4時から20時）を表している。

相対照度は樹冠の上部から下部に行くにしたがい、また外側から内側に行くにしたがい減少する。これは枝条の遮蔽により相対照度が減少することを表している。

18年目の支幹～21年目の支幹における相対照度は、上方や側方の枝条によって遮蔽されているため、一般的には低い値となっているが、1日に何回か明るくなる。これは木漏れ日（直達光）によるものと考えられる。

V　樹冠形成のシミュレーションモデル化

樹冠形成シミュレーションは次のような手続きを経て行われる。すなわち、はじめに元枝となる枝条1本の苗があり（図－28.①）、設定された光条件下で翌年のシュートのための冬芽をつける。そしてその冬芽が展開しシュートとなり、そのシュートがそれぞれの光条件下で翌年のための冬芽を付ける。そしてその冬芽が展開しシュートとなる。このようなことを時間軸に沿って繰り返し、枝条を積み重ねることでシミュレーションが行われる。

元枝（ここでは1年枝）とそこから出るシュート（頂枝・亜頂枝・側枝）を1つの単位である枝条ユニットと考え、シミュレーションモデルの基本単位とした。

元枝1本から1ユニットをつくるためには、光条件を考慮しながらシュートの分岐位置・伸長量・分枝角度・傾斜角度などを決める必要がある。

図－28は1つの枝条ユニットをシミュレーションするときの過程を表している。ま

た図－29は樹冠形成シミュレーションのフローチャートである。以下に過程を詳しく説明する。

1．元枝の所の光条件

（図－28.①、図－29.①）

任意の場所の相対照度を求めるには、その位置を樹幹最上部（梢）から垂直距離と樹冠縁部からの水平距離によって決め、その座標で得られた実測値（Ⅳ.8.参照）を利用する。

2．展開するシュートの合計長

（図－28.②、図－29.②）

1本の元枝から出るシュートの合計長を、元枝長と光条件によって求める（Ⅳ.1.参照）。

3．シュートの分枝パターン

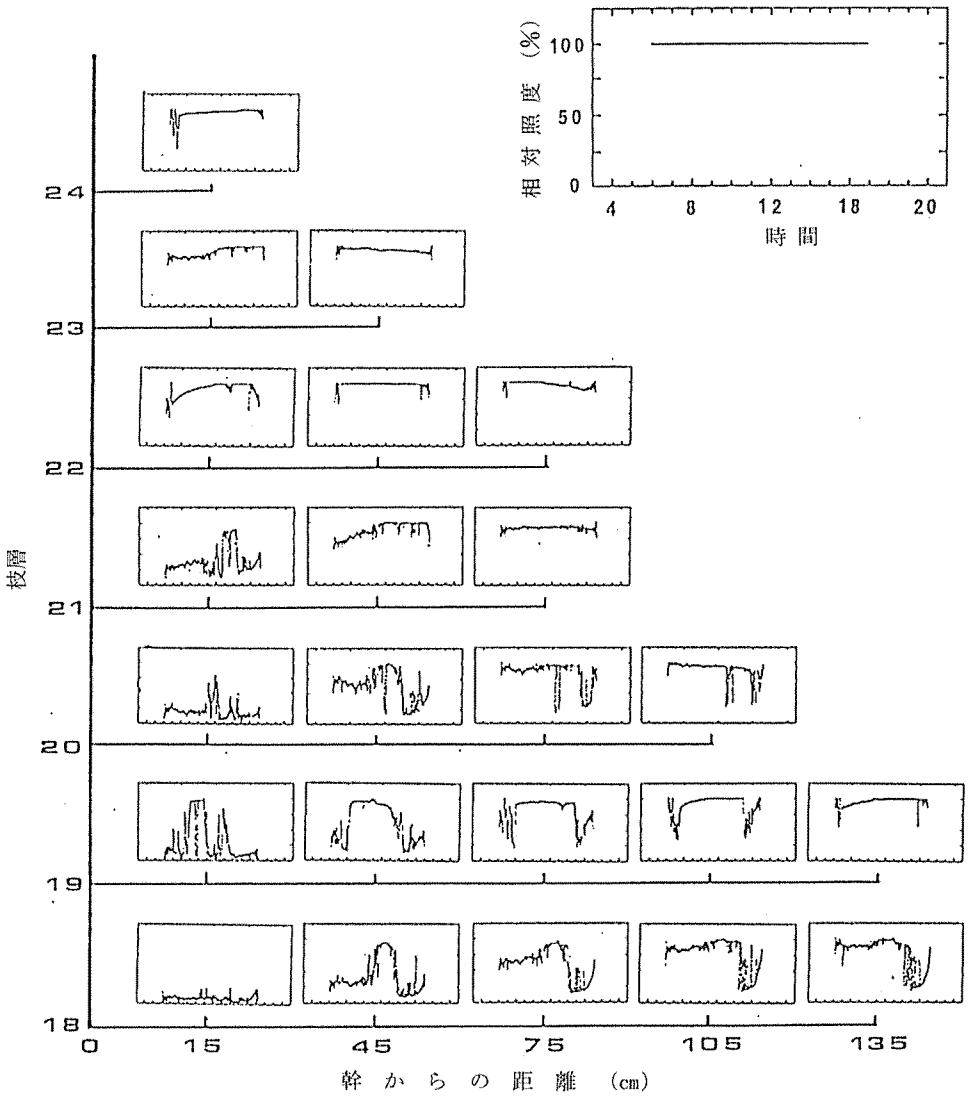
（図－28.③、図－29.③）

元枝の長さによって、側枝の有無と分岐型のパターンが決まる（Ⅳ.2.とⅣ.4.参照）。

4．シュートの伸長量

（図－28.④、図－29.④）

分岐型ごとで、元枝長とシュート長の関係（Ⅳ.3.とⅣ.4.参照）を利用して頂枝、



図－27　樹冠内の相対照度の日変化

亜頂枝、側枝の長さを求める。

5．シュートの分岐角度

（図－28.⑤、図－29.⑤）

分岐角度については、枝条の種類（頂枝、亜頂枝、側枝）と長さによって推定できる（Ⅳ．5．参照）。

6．シュートの傾斜角度

（図－28.⑥、図－29.⑥）

傾斜角度も分岐角度と同様に、枝条の種類（頂枝、亜頂枝、側枝）と長さによって推定できる（Ⅳ．6．参照）。

7．本幹からのシュート

本幹から展開する亜頂枝と側枝については、幹から直接出ていない枝条と同じように求めたが、頂枝の長さは元枝（元幹）の影響を受けないため、常に一定の範囲の中におさめた。

8．各シュートの空間座標（図－29.⑦）

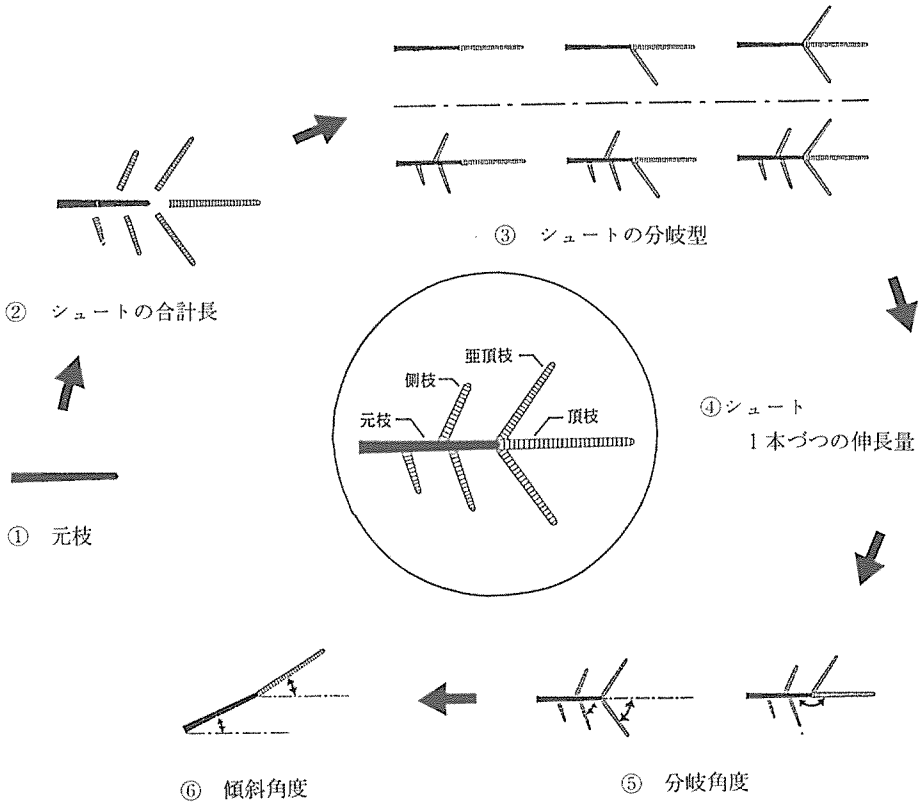
空間座標は各シュートが樹幹内のどの位置に存在するかを表すために必要である。そのために樹木の根本つまり枝条番号１Ａの下端の座標を決める（苗の長さを入力するときに決める）。それを基点にして、長さ、分岐角度、傾斜角度から先端部の座標を決定する。次に枝条番号１Ａから出ている２Ａ・２Ｂ・２Ｃ・２Ｄ・・・番号のシュートの空間座標をそれぞれの枝条の長さ・分岐位置・分岐角度・傾斜角度から算出する。同様それぞれから出ているシュートの座標を決定する。以上の計算を繰り返し行い、末端部分まで座標を決定する。

Ⅵ　考　　察

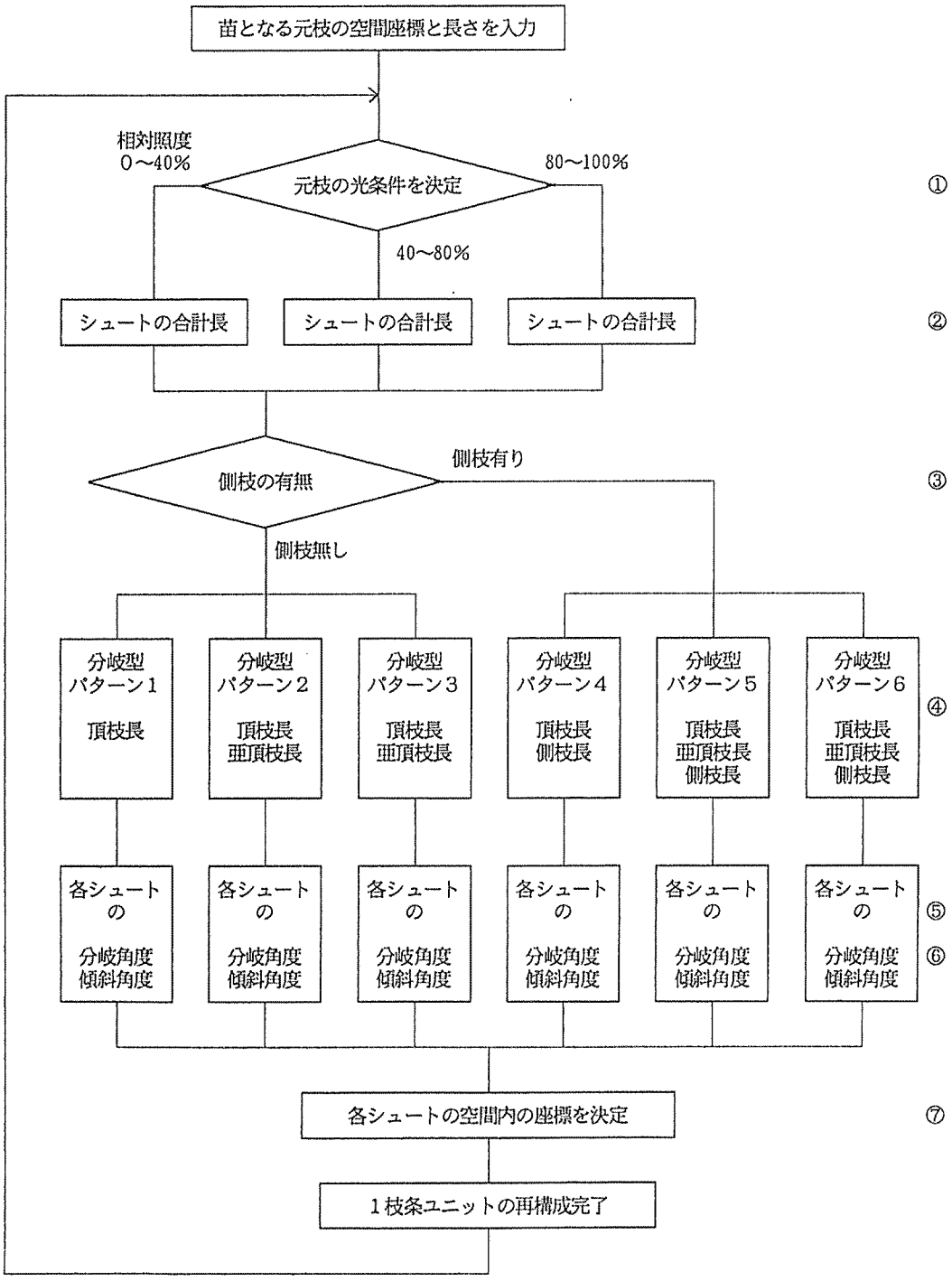
1．シミュレーション結果と実測値の妥当性の検討

樹冠形成シミュレーションの結果と、実際に測定した５年分のモミを比べることによって、樹冠形成シミュレーションの結果の妥当性を検証した。

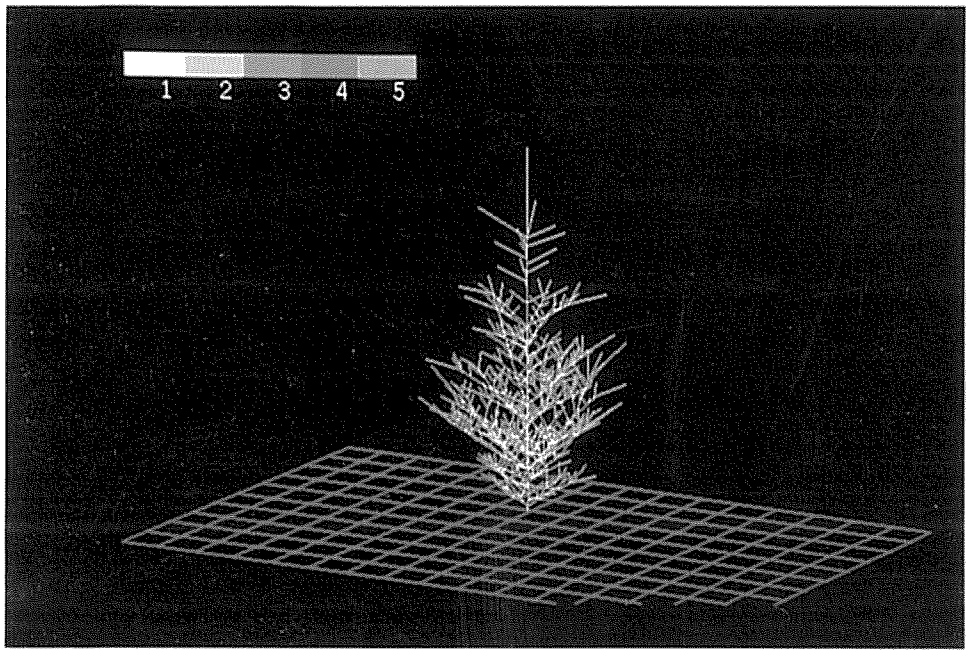
写真－１・２に示したように、樹冠を構成



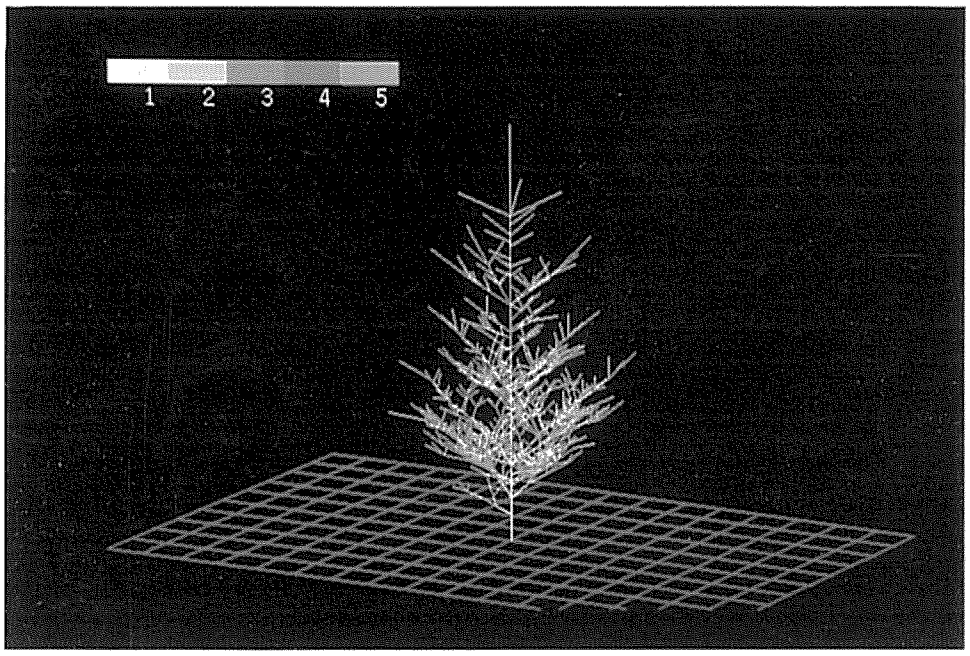
図－28　１ユニットの形成過程



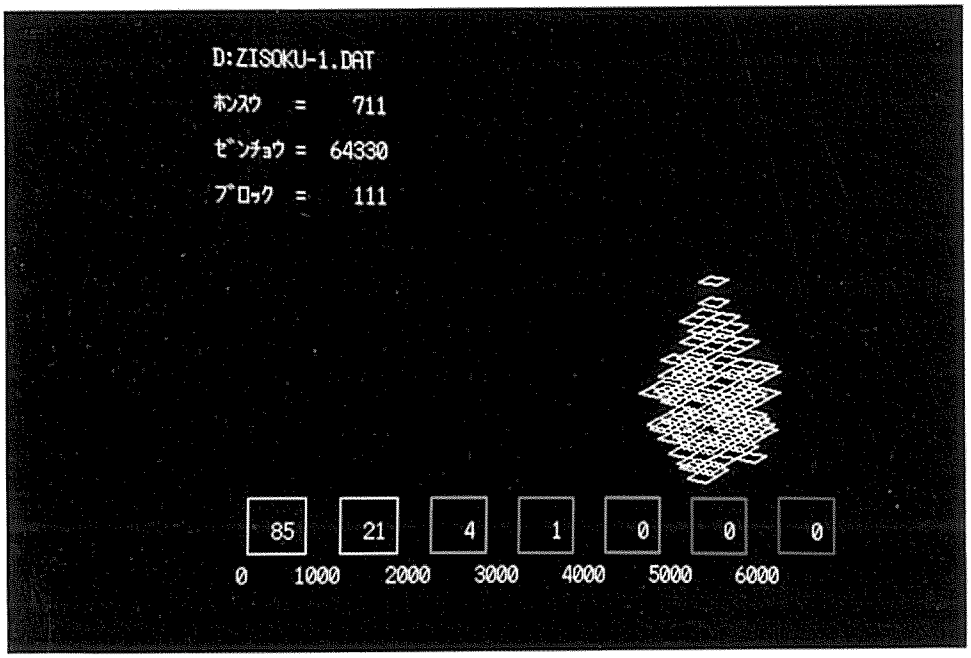
図－29　樹冠形成シミュレーションのフローチャート



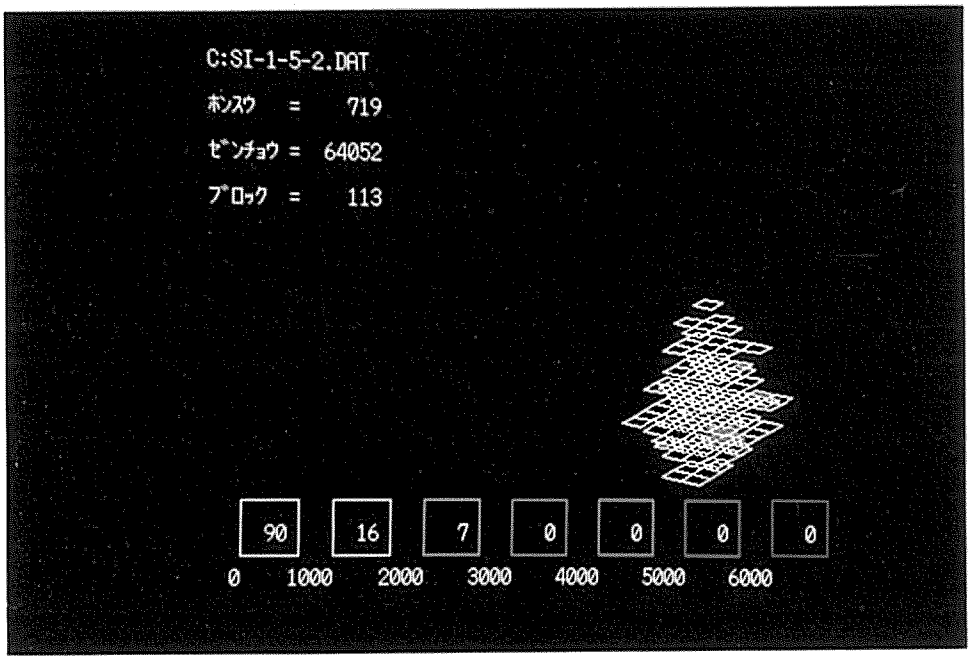
写真－1　5年間の実測値－1



写真－2　5年間のシュミレーションの結果－1



写真－3　5年間の実測値－2



写真－4　5年間のシュミレーションの結果－2

表－1　樹冠を構成している枝条の比較

比較項目	実測値	シミュレーションの結果
枝条の本数（本）	711	719
枝条の合計長（mm）	64,330	64,052
樹冠部の広がり（樹冠を構成している立方体の総数）	111	113

している枝条を1年目（苗）を白色、2年目を黄色、3年目を水色、4年目を緑色、5年目（当年枝）を紫色によって立体的に表示比較した。両者の間に実測値とシミュレーションの結果との間にほとんど差が認められない。

そこで写真－3・4に示したように、枝条の本数と合計長を比較した。また立体的な広がりを比べるために樹冠部分を、1辺が200mmのブロックで区切った。ブロックをそれぞれブロックの中に含まれる枝条の合計長によって色分けし、それぞれ色のブロック数で比較した。各色のブロック内の数字がそのブロックの個数であり、ブロックの下の数字が枝条の合計長である。

表－1に示したように、樹冠部を構成している枝条の本数、合計長にほとんど差がなかった。また、樹冠の広がりの面でも、樹冠部を構成している立方体の総数に差が無く満足のいく結果が得られた。

Ⅶ　まとめ

自然状態の樹木から測定した枝条の成長法則や光条件から様々な関係式を導き出し、それらに基づいてシミュレーションを行うことによって、樹冠形成を再構成できることが確かめられた。

またここで用いたモミ樹冠形成シミュレーションの手順は、他の樹木にも応用できると考えられる。

今後は、光条件を枝条の遮蔽状況をもとにシミュレーションし、林内の相対照度を立体的に表現できるようにする必要がある。それによって枝条の伸長量をより正確に求めることが可能になり、複雑な光条件をともなう10年を越えるような樹冠や林分のシミュレーションができる。最終的には天然林や複層林などの施業管理や樹木の成長予測に役立つと思われる。

引用文献

角張嘉孝・持丸和正・守谷孝志：超高速・マルチチャンネル光環境計測システムの試作とその応用．第101回日本林学会大会発表要旨集，643p（1990）

黒岩澄雄：物質生産の生態学．東京大学出版会，pp58-59（1990）

MONSI, M. und SAEKI, T.Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellshaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Jap.Journ. Bot., **14**, 22-52（1953）

槙山次郎・森下　晶・糸魚川淳二：日本地方地質誌中部地方．朝倉書店，p283-284（1975）

初島住彦：日本の樹木，p107-133（1976）

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．日本林学会誌，72，p234-238（1990）

静岡地方気象台：静岡県気象月報1990 1月-12月（1990-1991）

参考文献

ARAKI.M : The Vertical Profile of Light Intensity in a Forest Stand（Ⅰ）．日本林学会誌，**67**，p1-10（1985）

HAGIWARA.A, Ninomiya.I, & Hozumi.k : Evaluation of the Light Climate in a *Chamaecyparis obtusa* Plantation by a Chemical Light-meter. 日本林学会誌，**64**，p220-228（1982）

本田久夫：樹木の幾何学模様．数理科学，**184**，p18-25（1978）

――――：樹木の分枝．別冊・数理科学，

p 78-85 (1986)
稲田勝美：光と植物生育，養賢堂，p 13-14 (1984)
石橋整司：天然林の成長予測（Ⅰ）シミュレーションモデルの作成．日本林学会誌，71，p 309-316 (1989)
石居　進：生物統計学入門　－具体例による解説と演習－，培風館 (1975)
J. Feder : FRACTALS，啓学出版 (1988)
水永博巳：間伐と枝打ちを伴うスギ人工林の個体生長モデルに関する研究（Ⅰ）－個体の占有面積と樹冠量のシミュレーション－ 日本林学会関西支部講演集，**34**，p 124-127 (1983)
――――：間伐と枝打ちを伴うスギ人工林の個体生長モデルに関する研究（Ⅱ）－大きさ別の個体分布パターンについて－　日本林学会関西支部講演集，**34**，p 128-131 (1983)
――――：間伐と枝打ちを伴うスギ人工林の個体生長モデルに関する研究（Ⅲ）－間伐後の個体間競争状態の変化－ 日本林学会関西支部講演集，**35**，p 76-79 (1984)
――――：間伐を伴うスギ人工林の個体生長モデル（Ⅳ）－シミュレーションの結果とその利用－ 日本林学会関西支部講演集，**40**，p 226-229 (1989)
中尾登志雄：九州におけるモミ、ツガ林の生態学的研究 宮崎大学農学部演習林報告，11号，p 48-68，p 103-119 (1985)
西田泰伸：再帰方程式と自然のパターン．数理科学，**307**，p 57-61 (1989)
野本宣夫・横井　洋太：植物の物質生産　東海大学出版 191pp (1981)
佐藤大七郎・堤　利夫：樹木　－形態と機能－，文永堂，309pp (1978)
佐藤大七郎：陸上植物群落の物質生産Ⅰa －森林－，共立出版，95pp (1973)
佐藤義雄：入門グラフィックス，アスキー出版局，252pp (1984)
重定南奈子：空き地をめぐる生物の競争．数理科学，**327**，p 52-57 (1990)
田中重五：原色日本林業樹木図鑑，p 10-11 (1964)
田崎忠良：環境植物学，朝倉書店，270pp (1978)
依田恭二：森林の生態学，築地書館，331 pp(1971)