

林冠動態モデルを用いた間伐方法の評価に関する研究*1

水 永 博 己*2

Evaluation of thinning system by canopy dynamic model

Hiromi MIZUNAGA

水永博己：林冠動態モデルを用いた間伐方法の評価に関する研究 岡山県林試研報14：1～49, 1998 間伐後の森林の変化を事前に具体的に予測できれば、間伐を実行する場合に非常に都合がよい。間伐は人工的に林冠孔隙（ギャップ）を創出する作業であると定義でき、間伐後の森林の変化は林冠ギャップの修復過程における林冠の動態と密接に関係していると考えられる。本研究では間伐方法の違いが着葉構造・幹材積・林床の光環境に及ぼす影響を評価することを目的として、間伐後の林冠修復過程におけるこれらの時間変化を予測する林冠動態モデルを構築した。

樹冠内の葉の分布状態は林冠の重要な構成要素であり、これらを林冠動態モデルに組み込むために、樹冠内の葉の空間分布を測定した。スギ及びヒノキの樹冠内の葉の空間分布は樹冠半径、幹軸からの水平距離、樹冠表面からの高低差の三つの変数による簡単な式（着葉分布密度関数）で計算することができた。

林冠動態モデルは次の4つの部分で構成される。1) 個体の陽樹冠形状と個体ごとの梢の三次元座標値を用いて林冠表面の三次元形状を推定した。2) 林冠表面形状と着葉分布密度関数を用いて個体ごとの葉の分布状態を予測した。3) 個体の葉の分布状態と葉の幹材積生産効率を用いて個体材積成長量を計算した。4) 個体の葉の分布状態と個体の位置から林床の光量子束密度の分布状態を予測した。すなわち、個体の根元の三次元座標値と樹高の個体データをモデルに入力することで個体の着葉構造、個体材積成長量、林床の光量子束密度の分布状態を計算できる。

モデルを検証したところ、次の点を根拠としてモデルの有効性を認めた。1) 林冠孔隙率は間伐後に指数関数的に減少し、その減少過程は過去に報告された相対照度の間伐後の変化と一致した。2) 間伐時の葉の垂直分布及び個体葉重量の予測値は実測値と一致した。3) 間伐後の林分葉量の変化は過去の報告例と一致した。4) 間伐時の個体材積成長量の予測値は樹幹解析データによる材積成長量と一致した。5) 間伐3～5年後の個体材積成長量の予測値とD2Hの変化から計算した個体材積成長量との相関は複数の林分をこみにしたときも高かった。6) 間伐直後の林床の光量子束密度の1時間ごとの平均値、1日の合計値及び出現頻度パターンは予測値と実測値で一致した。

モデルの有効性が検証されたので、3つの間伐種（下層間伐、上層間伐、全層間伐）と4段階の間伐強度（材積間伐率10%、20%、40%、60%）を組み合わせると12の間伐案で間伐した場合と無間伐の場合について平均樹高成長量を3段階（0.3、0.5、0.7 m・yr⁻¹）に変えて林冠動態モデルにより間伐実験を行い、間伐後の着葉分布と材積成長量を予測した。その結果次のことが明らかとなった。1) 林冠孔隙率の減少速度は樹高成長量、間伐強度、間伐種の影響を受けた。林冠孔隙率は樹高成長量が大きいほど、間伐強度が小さいほど早く閉鎖した。また下層間伐は上層間伐より林冠孔隙の閉鎖が早かった。2) 個体葉重量や個体材積のRGRは間伐後の樹高成長量や間伐強度に大きく影響を受けたが、間伐種による影響は受けなかった。すなわち、上層間伐でも下層間伐や全層間伐と同程度の個体成長促進効果がみられると考えられる。3) 無間伐の場合や間伐強度が弱度の場合、林内の着葉分布は成長に伴って上方に移動するのみで分布形に変化はみられなかった。一方間伐強度が大きい場合、成長に伴って着葉空間が上方へ移動する一方で林冠下部の層別葉重量密度は大きくなり、間伐は林内の葉の垂直分布に大きな影響を及ぼした。4) 下層間伐の場合、間伐後5年目の個体材積の変動係数が他の間伐種に比較して小さく、個体サイズを均一化させる効果があると考えられた。

3段階の間伐強度（材積間伐率20%、33%、50%）の機械的間伐案に基づいて間伐実験を行い、間伐強度が曇天時の林床の相対光量子束密度に及ぼす影響を予測した。曇天時の相対光量子束密度は林冠孔隙率と高い相関がみられた。また樹高成長量が0.3 m・yr⁻¹のときには相対光量子束密度の減少速度は0.1 yr⁻¹前後と小さく、間伐直後の相対光量子束密度の半分になるまでの期間は5年前後と考えられた。

キーワード：林冠動態モデル・間伐・着葉分布・光量子束密度

Mizunaga, H. : Evaluation of thinning system by canopy dynamic model. Bulletin of the Okayama Prefectural Forest Experiment Station 14 : 1～49, 1998 It is helpful for planning the thinning to predict some changes of the stand structure after thinning. The changes of forest structure after thinning are closely related to canopy dynamics, because canopy gaps are created by thinning. As such, a canopy dynamic model was constructed to simulate the changes of foliage distribution, stem volume, and photosynthetic photon flux density (PPFD) distributions on the forest floor during the closure of canopy gaps, to evaluate the effects of different sorts of thinning.

The spatial foliage density distributions within the crowns of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* were measured, because the foliage distribution pattern within the crown is an important component of canopy structure. The foliage density can be calculated using the equation of "Foliage density function"

*1本論文は岐阜大学大学院連合農学研究科学学位論文を一部加筆したものである

*2現鹿兒島大学農学部 元岡山県林業試験場

which simple equation consists of the crown radius, the horizontal distances from stem axis, and the vertical distances from the crown surface.

The canopy dynamic model was composed of four integrative parts: 1) The three-dimensional shape of the canopy surface was simulated from three-dimensional positions of the apex and the shape of sunny crown; 2) The foliage distribution of individual tree was calculated based on the shape of the canopy surface and "Foliage density function"; 3) The individual increment of stem volume was calculated from the foliage distributions of each individual tree and the foliage efficiency of stem volume production; 4) PPF distribution on the forest floor was simulated from the shape of the canopy surface, "Foliage density function" and the position of the sun. Consequently, it is possible to predict the distributions of foliage, the individual stem volume increments, and PPF distribution by this model. The model requires only the three-dimensional positions of the bases and the initial heights of individual trees as individual data.

The verification of this model suggested its availability as follows: 1) The simulated canopy gap ratio decreased exponentially after thinning. These reductions were similar to the actual changes of relative light intensity that were reported in previous papers. 2) The simulated foliage vertical distributions and foliage weights of individual trees at thinning corresponded to measured values. 3) The simulated changes of foliage weights in the modeled stands due to thinning were similar to actual changes that were reported previously. 4) The simulated individual stem volume increments at thinning corresponded to the stem volume increments which were measured by stem analysis. 5) The simulated individual stem volume increments during three or five years after thinning corresponded to the stem volume increments that were calculated from the changes of D^2H . 6) The simulated PPF on the forest floor corresponded to actual values in daily totals, hourly averages, and frequency patterns.

Twelve thinning systems were planned with three different types of thinning (lower-story thinning, upper-story thinning, and all-story thinning) and four thinning intensity classes (thinning rate represented by stem volume; 10%, 20%, 40%, and 60%). The foliage distribution and the stem volume increment were simulated by the canopy dynamic model with three mean tree-height-growth classes (0.3, 0.5, and $0.7 \text{ m} \cdot \text{yr}^{-1}$), assuming that the forest was thinned by twelve thinning plans and was not thinned (control), respectively. The following results were demonstrated by this simulation. 1) The decreasing rate of the canopy gap ratio was effected by mean tree-height-growth class, thinning intensity class, and thinning type. The decreasing rates increased with the thinning intensity and mean tree-height-growth. The canopy gaps closed faster in lower-story thinning than in the other thinning types. 2) The individual foliage weights and RGR of stem volume were effected by mean tree-height-growth class and thinning intensity class, but not by thinning type. Hence, the upper-story thinning promoted the individual growth like the other thinning types did. 3) The vertical foliage distribution pattern in the stand did not change and only rose upward accompanying the tree-height-growth in the mild thinning, which thinning ratio was less than 20%. On the other hand, in the intensive thinning, the foliage weights at lower parts of the canopy increased, and the foliage vertical distributions skewed downward more than in mild thinning. 4) The variance of individual stem volume at five years after thinning was smaller in the lower-story thinning than in the other thinning types. This result suggests the possibility of homogenizing the individual size by the execution of lower-story thinning.

Relative PPF on an overcast day was simulated assuming that forest was thinned by mechanical thinning plans with three different thinning intensity classes (thinning rate represented by stem volume; 20%, 33% and 50%). Relative PPF was closely related to the canopy gap ratio. The decreasing rates of relative PPF after thinning were 0.1 yr^{-1} , and it took about five years for the relative PPF to become half of the value at just after thinning, when the tree-height-growth was $0.3 \text{ m} \cdot \text{yr}^{-1}$.

Keywords : canopy dynamic model, thinning, foliage distribution, photosynthetic photon flux density

第1章 序 論

1.1 これまでの間伐の研究と間伐の意味

一般に日本の人工林育成は、造林、下刈り、除伐及びつる切り、間伐及び枝打ちの順序で作業がすすめられている。このうち間伐は、日本国内で年間約30万haの人工林で実施されており⁽⁶¹⁾、人工林育成作業の中でも主要な作業と位置づけられている。このような日本の間伐の起源は17世紀にさかのぼる⁽⁷²⁾と言われており、古くから間伐に関する研究が数多くなされてきた。

1950年代以前の間伐に関する研究では間伐する木と間伐しない木をどのような基準で選ぶかという点に関心が置かれ、樹型級の決定について報告がなされている⁽⁹²⁾。藤島⁽¹⁰⁾は「生産目的は木材の量の大きさを望むのみではなく、質の善美を希望するものなるが故に、立木は林分として適当なる構成状態を保ち、健全にして幹形の良いものを多からしめねばならない。而してこれらは主として樹冠の調節に待つほかなく、間伐の目的は実にこの点に存するのである。」

と述べ、間伐は残存個体の樹冠を調節する作業であると定義している。このような研究は、それまでの間伐が単木的取り扱いの傾向が強く品質面が重視されていたことを背景としているといわれている⁽⁶⁷⁾。

樹型級による定性的間伐は客観性がなく名人芸の間伐技術が必要だとして多くの批判がなされ、1950年代になって間伐強度についての量的な指針が求められるようになった^(72,87)。そして林内の個体数密度と物質生産の関係について多くの研究がなされ^(8,86,87)、Kiraら⁽⁴⁰⁾のC-D効果を利用した林分密度管理図⁽⁴⁾やH-D- ρ -Vダイアグラム⁽³⁾に集大成された。このような森林内の個体数密度と平均の個体サイズの関係を中心とした研究では、間伐は森林内の本数密度を管理して個体間の競争を緩和する技術であると定義される⁽⁸⁷⁾。このような密度と森林全体の生産力に関する研究は「木材生産が質から量を求められる時代」⁽⁸⁷⁾を背景として発達したと考える。

菊沢⁽³⁹⁾は、林分密度管理図では平均値レベルでの情報しか得られないことを批判して、個体サイズの頻度分布に及

ばす間伐の効果について報告した。彼は間伐の目的を「所定のサイズより大きな個体の数を多く生産すること」と定義した。また間伐後のサイズ別頻度分布の変化について、森林経理学的立場から予測する試み^(2,98)も行われている。これらの研究は森林から木材を収穫する場合に林全体の平均値よりは直径級別の個体数が必要とされる現実を背景として進められていると考える。この場合には間伐は現在の林の直径階頻度分布に変化を与えて、目的とする直径階頻度分布に誘導しようとする作業と定義できるであろう。

以上述べたように、今までの間伐に関する研究において、間伐は次のように定義されてきた。

- A：欠点のある樹木の樹冠が占める空間を残存する樹木に配分して、健全な樹木を育成するとした樹冠調節作業。
- B：個体間の競争を緩和して平均の個体サイズを大きくするための密度管理作業。
- C：所定の径級以上の個体数を増やすために個体の直径頻度分布状態の変化を与える作業。

ところで、間伐を行うことによって、つぎのような利点があると言われている⁽⁷³⁾。

- ① 残存する個体の肥大成長が促進される^(39,72)。
- ② 冠雪害や風害に対して抵抗性のある林ができる⁽⁴⁸⁾。
- ③ 欠点のある樹木を淘汰できる。
- ④ 間伐された樹木が利用できる。
- ⑤ 林床に光がはいり、植生が繁茂する⁽⁴¹⁾。
- ⑥ 森林内に更新稚樹がある場合には、この成長を促進する。

森林経営者はこれらの利点のうち一つ以上の利点を得ることを目的として間伐を実行する。この場合、間伐の目的は森林経営者の意志により決定されるもので多様である。また間伐の目的は時代の変化に伴って変化する。たとえば、過去においては、主に残存個体の生育に注目した間伐が行われていたが、最近では環境保全の面からの間伐、複層林造成の場での間伐、収入を得るための間伐などが現実に行われるようになってきた。

前述のA、B、Cの間伐の定義はいずれも残存個体の保育を目的とした間伐を対象としている。このため、これらの定義では林床の植生や更新稚樹の育成などの目的で行われる間伐については、必ずしも十分な定義であるとはいえない。そこで間伐についての新しい定義が必要とされると考える。本論文では、次に述べる理由から、間伐は林内の中のある個体を切る作業であり、その個体が持っていた樹冠が失われることで、林冠に孔をあける作業であると定義した。言い換えれば間伐とは人工的に林冠の孔を創出する作業と定義した。もし間伐によって生じた林冠の孔を林床の植物が利用する場合には、林冠の孔は林床植生の繁茂や複層林造成を目的とした間伐に関係し、孔の周囲の個体が利用する場合には残存木の成長促進を目的とした間伐に関係する。林冠の孔を占有していた樹木を利用する場合には収入を目的とした間伐に関係する。この意味で、本報告の間伐の定義は多くの目的に対応しうる柔軟な定義であると考えられる。ただし、この定義では他の個体によって十分

に被圧された個体のみを伐採し、林冠に全く孔をあけることがない場合について（たとえば林分全体の呼吸消費を抑制したり、下層木同士での相互被陰を抑制する等の目的で行い得る）、この作業を間伐と呼ぶことはできない。しかしこのような目的のための作業は、現実に行われている保育作業から考えれば特殊な作業であり例外として取り扱った。

本論文の間伐の定義では林冠の孔が重要な意味を持つが、従来用いられている間伐の指針（たとえば密度管理図⁽⁴⁾や収量密度図⁽³⁹⁾）では現実には間伐すれば林冠に孔が生じるのにもかかわらず、林冠に孔が生じないと仮定していることに注目してほしい。

1.2 林冠構造の間伐作業における意味とこれまでの研究

前節で間伐は林冠に孔をあける作業であると定義した。間伐木選木の現場においては、個体の質的な情報とともに樹冠の状態を把握しながら、間伐後に生じる林冠の孔をイメージして間伐木を選ぶ場合が多い。このような見地から、林冠が持つ情報は間伐作業を考える上で重要な意味を持つと考えられる。

間伐後の樹木の成長を考える場合、林冠を構成する個体の樹冠構造は次の理由から重要な意味を持つと言える。樹木の成長は個体の生育空間に密接な関係があることが指摘されており^(1,20,70)、樹木の成長を予測するための指標として生育空間を用いることがこころみられている⁽⁹⁷⁾。高田ら⁽⁸⁸⁾はその指標が個体サイズと生育空間を組み合わせたものである必要を指摘している。樹冠サイズは個体自身のサイズと隣接する個体との競合状態から決定されるもので、その点で樹冠は生育空間と個体サイズを組み合わせたパラメータであるといえる。また、樹冠は同化器官が分布する空間であるので、着葉量や物質生産量と関係が深いと言われている^(19,20,27~29,70)。

さらに複層林造成や林床植生の繁茂を目的とする間伐を考える場合にも、林冠構造は重要な意味を持つと言える。林床の植物群落や下層に植栽された苗木の成長はその場所の光条件の影響を受ける^(7,94,95)。林床の光は周囲の上層木の葉量に伴って減衰するので⁽¹⁰⁰⁾、林床の植物個体の成長は周囲の樹冠の配置状態に強く影響されると考える。

このように樹冠や林冠の構造は重要な意味をもつため、これらの構造について従来からいくつかの研究がなされている。

梶原は^(24~30)スギ、ヒノキの樹冠形状及び樹冠量について一連の研究をおこない、これらの基本的な性質をあきらかにした。また猪瀬は⁽¹⁹⁾トドマツにおいて樹冠サイズの変化をもとに単木の成長モデルを構築した。これらの研究は単木を対象としているため、林分内の競合状態にあるすべての個体について間伐の効果を知ることはできない。このため単木の樹冠ではなく、林冠全体をカバーする必要がある。

林冠構造の解析について、いくつかの研究が行われている^(13,59,79)。しかし、これらの研究はある時点の静的な林冠構造について解析したものであり、間伐後に生じた林冠孔隙が修復される過程における林冠の動態について注目していない。間伐と林冠構造の関係を考える場合には、間伐後の

一時点の林冠構造ではなく、間伐後の林冠の時間的変化を把握する必要がある。

1.3 研究の背景と目的

森林経営目的は木材生産を重視したものから、環境保全を重視したものまで多様である。木材生産の面だけに限っても、どのような木材を作るかについて多様な経営目的がある。また社会条件等の外部環境の変化に伴って、当初の経営目的が変更される場合がある。

たとえば、現実には次のような場面が考えられるであろう。短伐期収穫をめざしていたが、木材不況により長伐期収穫に変える。木材生産を重視した作業から、環境機能を重視した作業に変える。労働力不足のため、植栽及び下刈りができないので、複層林や天然更新などに切り替える。労働力不足のため当初の計画より間伐作業に遅れが生じ、計画の見直しが必要である。緊急に木材を現金化する必要があり、林の中から抜き切りをしたい。

このような経営目的の多様化や急激な変化に適切に対応するためには、画一的な間伐技術や間伐指針では不十分である。すなわち、一つの間伐方法が多様な全ての経営目的を満足させるというようなオールマイティの間伐方法があるわけではなく、森林経営目的ごとに、それぞれの場合に最適な間伐方法があり、これらを個別に計画することが必要である。

ここで、もし間伐後の森林内の個体の幹成長量や林床の光環境に及ぼす影響を複数の間伐案について事前に予測できれば、予測された結果を相互に比較することで森林経営目的に適した間伐案を選ぶことができるので、間伐方法を考える上で都合が良い。

生態系の動態など、複雑なシステムの変化を予測するためにシミュレーションによる分析を利用することは有効であると言われている⁽²¹⁾。著者⁽⁵⁴⁾は、モンテカルロシミュレーションモデルを利用して、天然林攪乱後の森林動態を分析し有用な結果を得た。このようなシミュレーションモデルの利用は間伐方法の違いが上述の森林構造に及ぼす影響を調べる場合も有効であると考えた。そこで、間伐方法を評価することを目的に、間伐後の林冠が修復される過程に注目して、林冠動態を予測することで間伐後の林分の着葉構造や個体幹材積及び林床の光環境の時間変化をシミュレートするモデル（林冠動態モデルと呼ぶ）を構築した。

本論文では林冠動態モデルの構築方法と、このモデルの有効性について検討した結果について論じた。また複数の間伐案を実施した場合の、間伐後の林冠が修復される過程における着葉構造や幹材積及び林床の光環境の時間変化を予測した結果を互いに間伐案間で比較して、間伐方法の評価をこころみた。なお、本論文は岐阜大学大学院連合農学研究科の学位論文として提出したものを一部加筆したものである。

第2章 林冠動態モデルの概要

2.1 モデルの適用範囲と仮定

シミュレーションモデルを構築する場合、そのモデルが対象とする時間的あるいは空間的な範囲をあきらかにして

おく必要がある⁽²¹⁾。本論文の林冠動態モデルの、対象とする問題と範囲を次のように設定した。

問題：間伐をした場合林内の個体の着葉構造や幹材積成長量はどのように変化するか？ また、林床の光環境はどのように変化するか？

範囲-1 樹種：スギ及びヒノキ。

範囲-2 林種：単一樹種を同時期に植栽された単純人工造林の壮齢林。

範囲-3 時間：間伐後5年間。このモデルは後述する理由により長期間を予測対象とすることはできない。ここでは森林施業計画の単位である5年間の予測をし、次の作業時の状態を予測することにした。また間伐後に生じる大きな森林生産構造の変化は間伐直後において著しいと考えたので、ここでは間伐後5年間を予測期間とした。この期間の森林は間伐によって林冠孔隙が生じたあとの林冠修復過程にあると言える。

範囲-4 空間：対象範囲内の立地条件の違いが樹木の成長に及ぼす影響が小さいと考えられる範囲。実際には第3章で述べる調査地をモデルの空間的な領域とする。この調査地はその内部の樹木の成長程度がほぼ均一になるように注意しながら設定した。

次にモデルを構築するために、次の点を仮定した。

仮定-1 個体の幹は通直で鉛直に立っている。

広葉樹やアカマツの場合、幹は必ずしも通直ではないが、範囲-1で定めたスギやヒノキの幹は一般的に通直であると言われており、現実の林の状態と大きく乖離することはないと考えた。

仮定-2 モデルの実行期間内で、枯死する個体はない。

実際の林では、樹冠が他の個体の樹冠によって被覆され光不足により枯死する場合及び気象害や病虫害などで枯死する場合があります。この仮定は現実的ではない。しかし樹冠の被圧によって枯死する場合、その個体の樹冠は既に他の個体の樹冠の下層に位置しているため、その生死が他の個体に及ぼす影響は小さいと考えられる。被圧された個体自身については、被圧された状態がどの程度の期間続けば枯死するかが解明されているわけではないので、モデル内では被圧されたままで生存することにした。被圧された状態にない個体が枯死する場合、その個体が持つ樹冠が失われ林冠に孔があくので、他の個体に及ぼす影響は大きい。しかしこのような偶発的で比較的頻度が小さい枯死をモデル内で考慮することは、得られるメリットは少ないと考えられ、一方モデルが複雑になるという欠点がある。林内の個体の枯死を無視しながら、長期間の予測を行えば、この仮定に伴う誤差が大きくなることは容易に想像されるが、本モデルは間伐後5年間をモデルの対象範囲としているので問題は少ないものと考えた。

仮定-3 幹軸上の任意の位置の単位長あたりの幹の年成長量はその上方にある葉の積算葉重量に比例する。この比例係数は時間的にも個体間でも不変である。

Chiba ら⁽⁹⁾や Osawa ら⁽⁶⁷⁾は、幹軸上の任意の位置の単位長あたりの幹の成長量がその上方にある葉の積算葉重量に比例することを仮定して、樹木のプロフィール理論を構築

した。本モデルでも彼らの仮定にしたがってモデルを組み立てることにする。

この比例係数は単位葉重量あたりの幹生産量を示すので、個葉の光合成能力と関係が深い。林内における土壌条件の変異が大きい場合や個体ごとの根系の発達程度が異なる場合には、林内の各個体間で養分や水分の吸収速度が異なるため、光合成能力に違いがみられると考えられる。また、光条件や気温、空中湿度などの気象条件は個葉レベルでの光合成能力や個体レベルでの物質生産能力に大きな影響を与えることが知られている⁽³²⁾。したがって年ごとの気象条件の差は物質生産能力に時間的な違いをもたらすにちがいない。また加齢によっても光合成能力が変化するであろう。このような光合成能力の個体間差や時間的な変異について生理生態レベルでの研究がなされているものの、定量的には十分に解明されているわけではない。そこで本モデルでは時間、空間に関するモデル対象範囲内では、葉が幹を作る能力に個体変異及び時間変異がないものと考えた。すなわち、範囲-3で設定した時間内では加齢による葉が幹を作る能力の変化を無視でき、範囲-4で設定した空間内では立地条件の違いによる影響は無視できるとした。

仮定-4 林内の平均樹高成長量は独立変数として与えられる。個体の樹高成長量は個体の条件に関係せず、正規分布型乱数であらわされる。

樹高成長量を仮定のように個体サイズや個体の密度環境あるいは物質生産量とは関係のない変数として示すことは現実の成長現象に忠実ではないかもしれない。しかしTanaka⁽⁹⁰⁾は樹高成長量が期首の樹高に依存しないことを報告している。林分密度は樹高成長量に影響を与えるとする報告⁽⁴⁹⁾があり、隣接個体における競合状態と個体の伸長成長量の関係が指摘されている⁽⁶⁰⁾。しかし、一般にはその影響程度は小さいと考えられ⁽⁶⁰⁾、安藤⁽⁴⁾の樹高と密度の関係については無視してよいという考察にしたがっておく。物質生産量の樹高成長への配分をもとにモデルを組み立てるのが望ましいかもしれないが、その配分を定量化することは困難である。このように樹高成長量を他の因子に結びつけて予測することは困難であるので、本モデルではとりあえずブラックボックスとして扱うことにした。この方法では林分の平均樹高成長量を任意に変化させてシミュレーションし立地条件別にモデルを実行できるため、立地条件が間伐後の個体成長に及ぼす影響を予測できるというメリットがある。

2.2 モデルに用いる用語の定義

このモデルでは間伐が個体の幹の成長量や林床の光条件に及ぼす影響を推定するために、樹冠の形や配列状態に注目した。そこで樹冠や林冠に関する記述をするために、必要な用語の意味を明らかにしておく必要があると考えて、本論文で使用する用語を定義した。この定義は本論文の論理を進めていくためのもので、一般に使用されている用語の意味とは必ずしも一致しないものがあることに注意すべきである。

樹冠：ある個体のなかで生きている葉が分布しているひとまとまりの空間。個葉や、葉のクラスターによって構成

される。

陽樹冠：鉛直上方が他の個体の樹冠に覆われていない個体の場合で、隣の個体の樹冠と接する部分より上部の樹冠(図-1)。ただし、4.2.2で述べる理由から過去に陰樹冠であったものが、間伐などにより隣の個体と樹冠が接しなくなった場合、この部分を陽樹冠に含めない。

陰樹冠：隣の個体の樹冠と接する部分より下方の樹冠(図-1)。あるいは鉛直上方が他の個体に樹冠が覆われている個体もつ樹冠。

被圧木：樹冠の上方が全て他の個体の樹冠で覆われている個体。すなわち、陽樹冠がない個体。

上層木：陽樹冠を持つ個体。

林冠：陽樹冠の集合体。

林冠の孔(林冠孔隙)：林冠を水平面に投影した場合に、林冠が無い部分。

林冠(樹冠)の表面：林冠(樹冠)の最も外側の曲面で、上空と接する部分。

陽樹冠形状関数：陽樹冠の表面を構成する枝先について、幹軸からの水平距離 r を変数として梢端からの高低差 Cl (下向きを正とする)を求める関数 $F(r)$ (図-1)。この関数について4.1で詳しく考察する。

枝の角度：枝先とその枝の付け根を結ぶ直線と水平線が交わる角度 θ (図-2の $\angle HOT$)。

着葉分布密度関数：樹冠内の葉の乾燥重量分布状態を示す関数。樹冠表面からの高低差 d と幹からの水平距離 r を

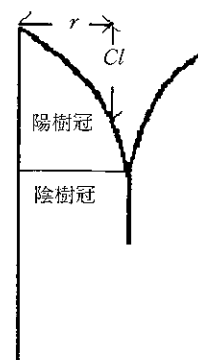


図-1 陽樹冠と陰樹冠の区分

陽樹冠は隣接する個体の樹冠と接する点より上の部分で、陰樹冠はその点より下の部分と区分した。

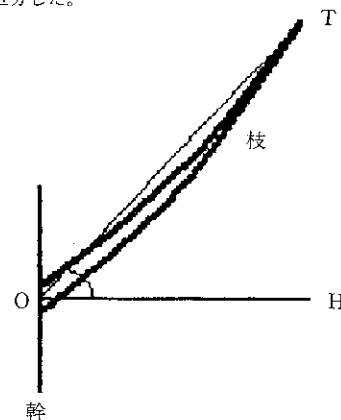


図-2 枝の角度の説明

T：枝先の位置、O：枝の付け根、H：枝の付け根から水平線上にある一点。枝の角度は角HOTで示される。

二変数として、その位置の葉の乾燥重量密度を求める関数 $fdd(x, y, z)$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。この関数について4.3で詳しく考察する。

葉の幹材積生産効率：任意の位置の単位長あたりの幹の年材積成長量を、その位置から梢までに分布する葉の乾燥全重量で割った値 μv ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$)。4.4で詳しく考察する。一般に用いられている葉の能率は個体の年間幹重量成長量あるいは年間幹材積成長量を個体葉重量で割った値（それぞれの単位は、 $(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1})$ ($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$))であり⁽⁷⁾、これとは意味が異なることに注意してほしい。

2.3 モデルの基本概念と流れ

モデル内の計算方法については第5章で詳しく述べるが、個々の測定や計算がどのような目的を持ち、全体としてどのようなつながりになっているかを示すため、モデル全体の概略を図-3の概略図を用いて説明する。

モデルの対象とする森林内の一点を原点とした三次元空間 (X, Y, Z 軸で表現し、 Z 軸を鉛直方向とする) を想定すると、個体の根元の三次元座標値 (X_i, Y_i, Z_i) とそのときの樹高 (H_i) から梢の三次元座標値 ($X_i, Y_i, Z_i + H_i$) を求めることができる (図-3のフロー1, 2)。間伐は林内の個体を伐採することであるから、間伐を行えば林内の個体の根元の三次元分布状態に変化が生じる (図-3のフロー3)。樹高成長量は個体の梢の Z 座標値の変化量と考えることができる (図-3のフロー2, 4)。

個体の梢の三次元座標値と陽樹冠形状関数から林冠の表面の形を次の考え方で求めた。林冠表面上の任意の点を (x, y, p) とし (図-4)、個体 i の陽樹冠が $(x, y, 0)$ の鉛直線を通してと仮定したときの座標 (x, y, p_i') は(1)式で計算できる。

$$p_i' = Z_i + H_i - F \left(((X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (1)$$

しかし、 p_i' は個体 i の最下部の枝よりも下には存在しないから、 p_i' のとりうる範囲は生枝下高と枝の角度を用い

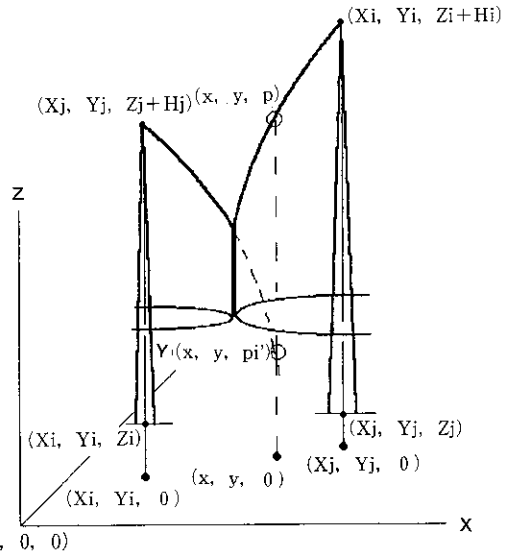


図-4 林冠表面形状推定のための概念

黒丸は XY 平面上の点を示す。黒四角は個体の根元的位置を示す。白丸は $(x, y, 0)$ の鉛直線と陽樹冠曲線の交わる点を示す。

て(2)式で計算できる。

$$p_i' \geq Z_i + H_i - \tan(\theta) \left(((X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (2)$$

H_{bi} : 個体 i の生枝下高。

そこで p_i' の最大値を持つ個体 (図-4の場合には個体 j) の樹冠が (x, y, p) を通過し、 p は p_i' の最大値である。このように、梢の三次元座標値、陽樹冠形状関数、生枝下高、枝の角度から林冠の表面の形状を推定することができる (図-3のフロー5, 6)。

林冠の表面の形から、着葉分布密度関数を用いて林の中の任意の位置の葉の分布状態を推定した (図-3のフロー7)。すなわち、個体 i の樹冠が $(x, y, 0)$ を被覆し、その位置の林冠の表面の座標が (x, y, p) である場合、(3)式で (x, y, z) の位置の葉重量密度 $f_{wc}(x, y, z)$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) を計算した。

$$f_{wc}(x, y, z) = fdd \left(((x_i - x)^2 + (Y_i - y)^2)^{\frac{1}{2}}, p - z \right) \quad (3)$$

個体の葉の分布状態から葉の幹材積生産効率を用いて幹の材積成長量を求めた (図-3のフロー8)。

林床の任意の位置の光条件はその点の周囲の幹や葉などの遮光物の分布状態に影響される。したがって林内の葉の分布状態と幹の分布状態及び地形の状態から林床の光条件を推定した (図-3のフロー9~11)。

このフローチャートで明らかのように、本モデルで入力とする個体情報は根元の三次元座標値と樹高の初期状態で、モデルの計算後に出力される情報は間伐後の個体の材積成長量や葉の分布状態及び林床の光環境である。

第4章ではモデルを構成するパラメータとしての陽樹冠形状や樹冠内の着葉構造及び葉の幹材積生産効率を測定し決定した。第5章ではモデルの組立て方法について述べ、モデルの予測結果を現実の森林で検証した。第6章では複数の間伐案を行った場合についてモデルにより予測して、それぞれの間伐案の特性を評価した。

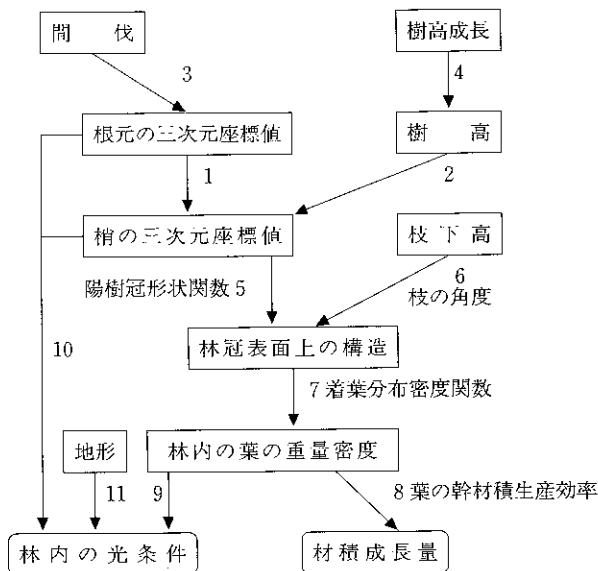


図-3 モデルの概略

図中の番号は本文中のフロー番号と一致する。

第3章 調査対象林と間伐方法

3.1 樹冠形態の調査林分とモデル対象林の概況

岡山県東北部の津山盆地の周囲の森林からヒノキ林10箇所とスギ林28箇所を選び(図-5), 樹冠の形態を測定した。この地域の地質は主に花崗岩が分布し, 第三紀層が一部に分布する。標高は200~600mの範囲にあり, 年降水量は1600~2400mmである。気候帯区分は暖温帯上部に位置する。土壌型はB_D(d)~B_D型土壌で, スギ及びヒノキの生育に適する土壌である⁽⁶²⁾。調査対象森林の林齢はスギの場合10年から45年の範囲でほぼまんべんなく分布し, ヒノキの場合4年から82年の範囲にあるが, 特に35年未満の林が多い(表-1)。

本論文の林冠動態モデルの有効性について考える場合,

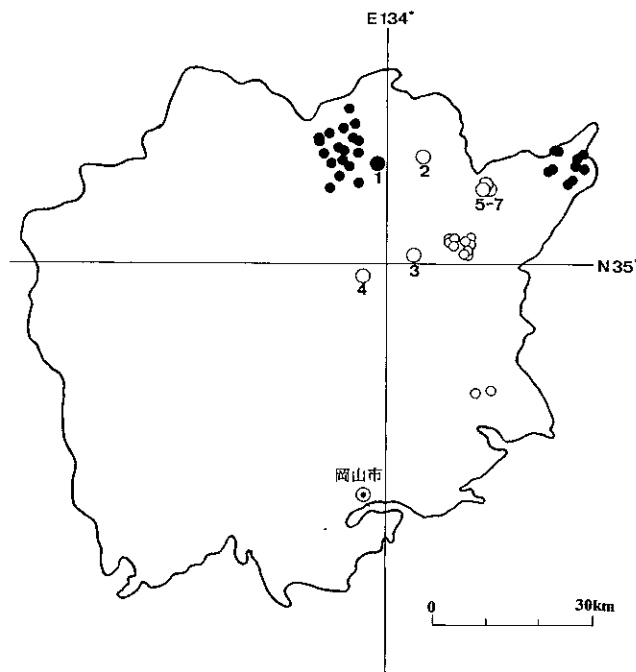


図-5 岡山県における調査林の位置
図中の数字は Plot 番号。黒丸：スギ林, 白丸：ヒノキ林。

表-1 樹冠形態の調査林 (モデル対象林を除く)

No.	樹齢 (年)	場所	樹種	No.	樹齢 (年)	場所	樹種
1	22	勝田郡勝央町	ヒノキ	20	27	苫田郡奥津町	スギ
2	55	"	"	21	27	"	"
3	14	"	"	22	29	"	"
4	32	"	"	23	30	"	"
5	38	"	"	24	30	"	"
6	13	津山市	"	25	32	"	"
7	12	"	"	26	32	"	"
8	8	"	"	27	33	"	"
9	82	"	"	28	10	英田郡西栗倉村	"
10	4	"	"	29	14	"	"
11	14	苫田郡奥津町	"	30	20	"	"
12	15	"	"	31	20	"	"
13	15	"	スギ	32	22	"	"
14	17	"	"	33	22	"	"
15	21	"	"	34	24	"	"
16	21	"	"	35	29	"	"
17	22	"	"	36	29	"	"
18	24	"	"	37	35	"	"
19	26	"	"	38	44	"	"

実際の間伐林分に適用して検証を行う必要がある。そこで, スギの人工林の1調査地(図-5中の番号1)とヒノキの人工林の6調査地(図-5の番号2~7)を選び, モデル対象林(以下, プロットと呼ぶ)とした。それぞれの林を図-5の番号に順序どおりに Plot 1, Plot 2……Plot 7と呼ぶ。Plot 2は林床の光環境の推定方法を検証するためのプロットで, その他のプロットは間伐後の幹材積成長量の推定方法を検証するためのプロットである。間伐実行時の林齢は15~35年で Plot 3が最も若く, Plot 5, 6, 7は同一の森林内にあり最も高年齢であった(表-2)。この地域の通常のスギ, ヒノキの植栽本数は3000~4000本 ha⁻¹であり, プロットの植栽本数もこの範囲内にあったものと考えられる。

本モデルでは林冠の表面形状の変化を三次元空間で把握した(図-3)ので, 全てのプロットに三次元座標軸を設定した(図-6)。間伐実行前に, プロット内で樹高が1.2m以上の個体全てについて, 根元の三次元座標値をコンパスと超音波距離計あるいは巻き尺の組み合わせで測定した。また, これらの個体の胸高直径を直径巻尺で測定した。Plot 3の樹高を測竿で, その他のプロットの樹高をハンドレベルと超音波距離計あるいは巻き尺の組み合わせで測定した。

平均樹高は9~16mで, Plot 2が最大で, Plot 3が最小であった。Plot 4の林分密度は高く, 当地方のヒノキ林の密度管理図上⁽⁶³⁾で, 収量比数が0.92でありかなり過密な林となっている(表-2)。

表-2 プロットの概況 (間伐前)

プロット名	面積	本数密度	平均直径	平均樹高	林齢	樹種	収量比数	場所
Plot 1	1,572	3,085	12.8	9.8	23	スギ	0.78	苫田郡鏡野町
Plot 2	1,690	1,362	18.9	15.6	32	ヒノキ	0.74	苫田郡加茂町
Plot 3	750	2,706	12.6	9.0	15	"	0.62	津山市
Plot 4	1,000	2,480	13.1	14.5	29	"	0.92	久米郡中央町
Plot 5	960	1,604	19.7	13.0	35	"	0.68	勝田郡奈義町
Plot 6	960	1,542	19.2	11.9	35	"	0.60	"
Plot 7	432	2,111	17.5	12.4	35	"	0.75	"

単位 m² 本・ha⁻¹ cm m 年

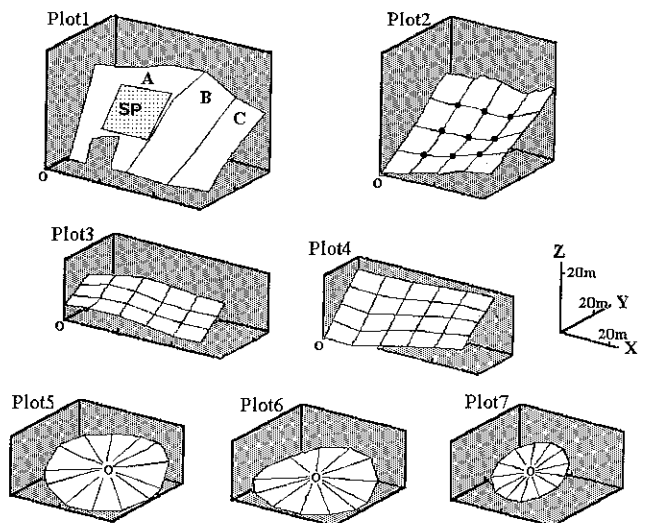


図-6 プロットの形状と地形

0は三次元座標値の原点を示す。Plot 1のSPは孔隙解析用のサブプロットの位置を示す。Plot 1のABCは間伐区を示す(表-3、図-7参照)。Plot 2の黒丸は光量子束密度の測定位置を示す。

3.2 モデル対象林の間伐方法

それぞれのプロットを表-3及び図-7に示す方法で間伐した。Plot 1の中央部について間伐を行わず、両サイドについて小径木を中心に材積間伐率が約30%の間伐をした(図-7, 表-3)。Plot 2は林床の光環境の改善を目的に材積間伐率が約35%の全層間伐をした。この場合、林を塊状に間伐して大きな林冠の孔を作った。Plot 3及び4は小径木を中心に材積間伐率が約20%の間伐をした。Plot 5, 6, 7は同一の森林内(図-5)に同時期に設置し、間伐の方法を変えた。Plot 5は大径木を中心に、Plot 6は小径木を中心に間伐した。両プロットの材積間伐率は約30%である。Plot 7は間伐をしなかった。

表-3 モデル対象林分の間伐方法

プロット名	材積間伐率	本数間伐率	間伐年
Plot 1-A	28.2	32.1	1982
Plot 1-B	0.0	0.0	
Plot 1-C	33.0	37.4	1982
Plot 2	35.3	36.2	1993
Plot 3	20.5	29.1	1989
Plot 4	22.2	27.4	1989
Plot 5	31.2	22.1	1990
Plot 6	27.6	33.1	1990
Plot 7	0.0	0.0	1990

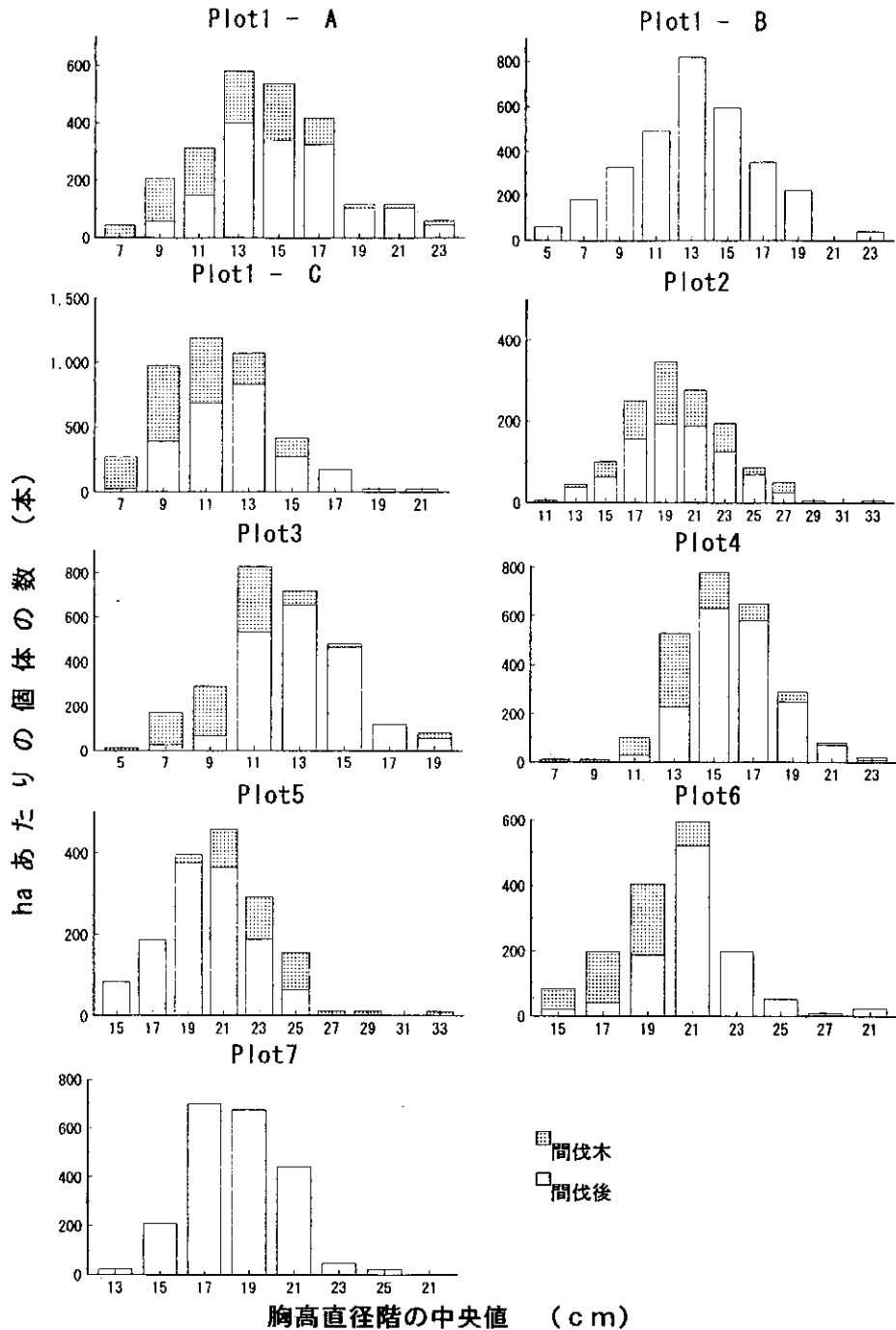


図-7 間伐前と間伐後の胸高直径階頻度分布

第4章 林冠動態モデルの構成要素としての
陽樹冠形状と着葉分布及び
葉の幹材積生産効率

4.1 陽樹冠の形状

4.1.1 陽樹冠形状と陽樹冠形状関数の持つ意味
ねらい

樹冠は陽樹冠と陰樹冠でその形状が異なることが知られており^(24,41)、梶原⁽²³⁾は陽樹冠と陰樹冠に分けて樹冠形状の解析を行う必要があることを強調した。本論文においても陽樹冠と陰樹冠を区別した。陽樹冠の形状はモデルの重要な構成要素である(図-3のフロー5)。そこで、陽樹冠を構成する枝について梢から枝先までの高低差 Cl と幹軸から枝先までの水平距離 r がどのような関係にあるか、すなわち陽樹冠形状関数がどのような式で表されるかを調べた。またその陽樹冠形状関数がどのような意味を持つかを検討した。

方 法

それぞれのプロット内の間伐木から胸高直径別に均等に8本~20本の樹冠形状測定用の供試木を選んだ。ただし、Plot 5, 6, 7は同一の森林内に位置し、Plot 5と6では間伐木の個体サイズが異なりPlot 7では間伐しなかったもので、Plot 5とPlot 6の間伐木の中からそれぞれ4本ずつ、森林全体で8本の供試木を選んだ。供試木について幹を枝葉が付いたまま梢から1mの材に切断した後、水準器を用いて材を地面に垂直に立てて、測量用ポールで枝先の地面からの高低差 Bh と r を5cm単位で測定した(図-8)。梢から i 番目の材の元口は梢から im の位置にあるので、 Cl は $i \cdot Bh$ で求められる。このようにして、陽樹冠を構成する枝について梢端から Cl と r との関係調べた。

従来、樹冠の横断形は円として扱われることが多い^(19,80)。梶原⁽²⁴⁾はスギの樹冠の横断形を測定し、「隣接個体との競合のため樹冠が非対称となりやすい樹冠下部は別として、空

間的余裕のある樹冠上部での横断形はほぼ円とみてよい。」と報告している。通常樹冠投影の形状は必ずしも円ではなく複雑な形状をしている場合が多いが、これは隣接個体により枝の成長が制限されるため樹冠そのものの形と区分して考えるべきであろう。そこで、本論文では陽樹冠の横断形は隣接木によって枝の成長が抑制されないかぎり円形であると考えて、方向による r の違いを無視して陽樹冠の形状の縦断形を解析した。

なお、この測定は樹冠下部で隣接木との相互被陰によって成長の制限されている枝や、樹冠中央部分でも周囲の枝に比較して著しく小さい枝を除いたすべての枝を対象におこなった。

結果と考察

樹冠の縦断形状は Cl と r によって示される。過去に両者の関係を示す関数(陽樹冠形状関数)がいくつか考えられている。

$$Cl = ar \tag{4}$$

$$Cl = ar^2 \tag{5}$$

$$Cl = ar^b \tag{6}$$

$$yc = Cl/SCL, xc = r/SCR \text{ のとき}$$

$$yc = xc/(a + bxc) \tag{7}$$

SCL ; 陽樹冠の長さ, SCR ; 陽樹冠基底部の半径

(4)式は樹冠を単純な円錐形として表すもので、式の単純さから使用される例が多い⁽⁴¹⁾。清水ら⁽⁸⁰⁾はスギの全樹冠が(5)式(放物線)で近似できるとした。猪瀬⁽¹⁹⁾はトマツの陽樹冠部分について、(6)式のべき乗式がなりたつことを示した。ここで、(4)、(5)式は(6)式のパラメータ b がそれぞれ1、および2の場合なので、二つの式とも(6)式に整理できる。梶原^(24,28)は(7)式がスギ、ヒノキの樹冠の形状に最も忠実であると報告している。(7)式は陽樹冠基底部の半径や高さが既知である必要がある。しかし本モデルは樹冠の形や梢の三次元座標値から個体の樹冠のひろがりやを推定し、陽樹冠基底部の半径 SCR はモデルの実行結果後の推定値として得られるものであるため、本モデルで(7)式を使用することはできない。以上のように(4)~(7)式の中では(6)式が本モデルに最もふさわしいと考えた。

測定した個体の陽樹冠を構成する枝の Cl と r は両対数グラフ上で直線関係にある(図-9に例示)ので、両者の関係は(6)式へよく適合することがわかった。そこで、本モデルでは陽樹冠形状関数は(6)式であらわされるものと仮定した。

つぎに、(6)式の陽樹冠形状関数のパラメータが個体間の競争にどのような意味を持つのかを隣り合う2個体の関係を例に次のような簡単なモデル(図-10)を使って考察してみた。

2個体とも同一の陽樹冠形状関数を持ち、2個体の樹冠は接しあうと仮定する(図-10の左)。このとき両者の個体間の水平距離が D (m) で、個体Aの梢は個体Bより zd (m) 高いとする。ここで個体Aの陽樹冠半径 Ra は(8)式を解くことで求められる。

$$Ra^b - (D - Ra)^b - zd/a = 0 \tag{8}$$

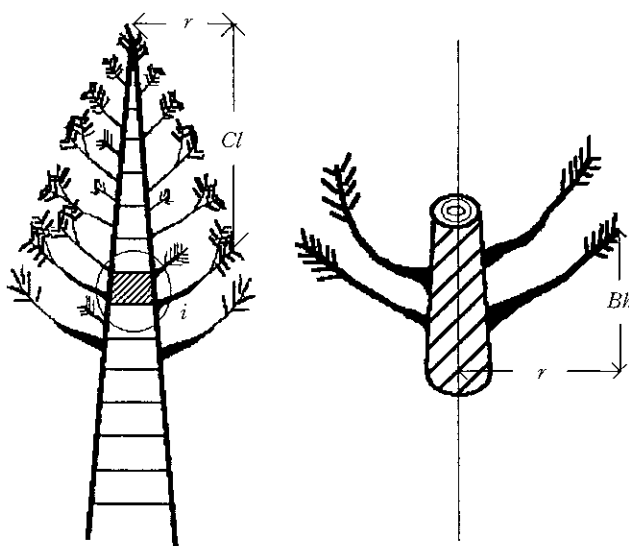


図-8 樹冠形状の測定方法

左側のハッチの部分の短材を地面に垂直に立て、右側のように r と Bh を測定した。同様の方法で全ての短材について測定し、 r と Cl の関係をもとめた。

D を一定とすると(図-11では、仮に $D = 2\text{ m}$ とした。), Ra は b と zd/a によって決定される。 $zd/a = 0$ のとき、すなわち梢の高低差がない場合は陽樹冠形状関数のパラメータに関係なく、 Ra は $D/2$ である。 a が大きくなると zd/a は 0 に近づくので Ra は $D/2$ に近づく。また b が大きくなる場合も Ra が $D/2$ に近づく。すなわち二つのパラメータが大きくなると樹冠は細い形となり個体の樹冠幅は均等になり、被圧は起こりにくくなる。

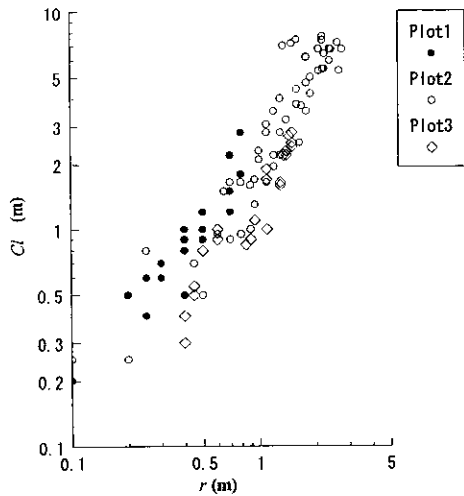
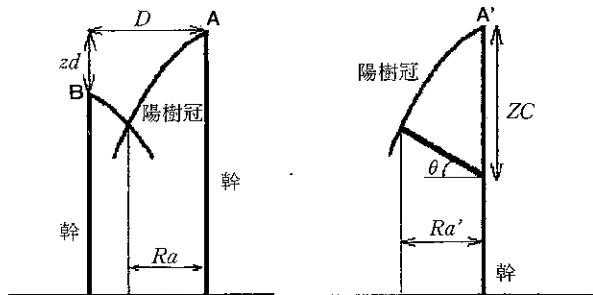


図-9 Cl と r の関係の例



隣接個体と樹冠が接する場合 隣接個体と樹冠が接しない場合
 図-10 簡易モデルによる陽樹冠半径の計算方法 A, B, A' は個体名

次に隣接個体と樹冠が接しない場合について考える(図-10の右)。この場合の陽樹冠半径 Ra' は梢から最下部の枝の付け根までの長さ Zc (m) と枝の角度を θ (°) を用いて(9)式を解くことで求められる。

$$aRa'^b + \tan(\theta)Ra' = Zc \quad (9)$$

Zc を一定とすると(図-12では、仮に $Zc = 6\text{ m}$ とした。), a, b が大きくなるにつれて Ra' は小さくなった。 a は 1

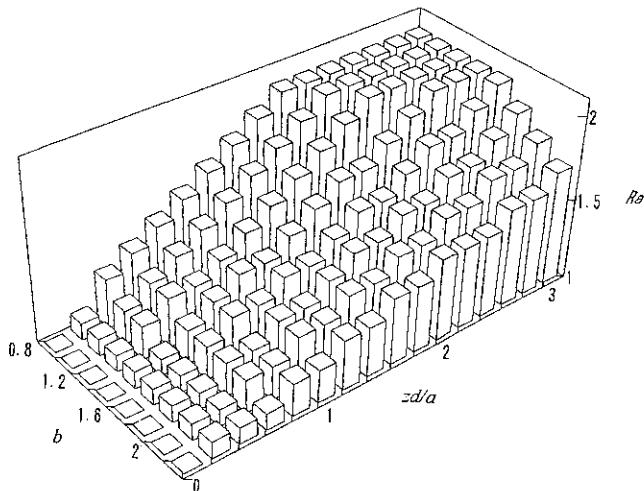
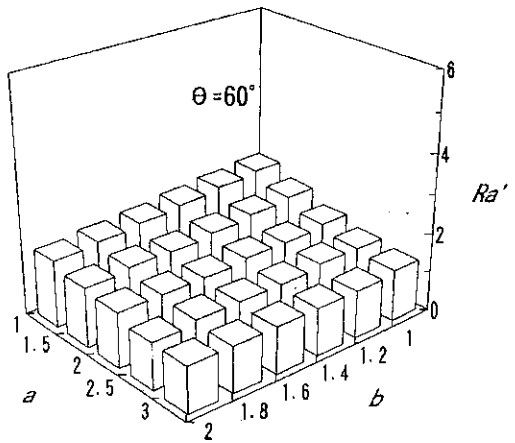
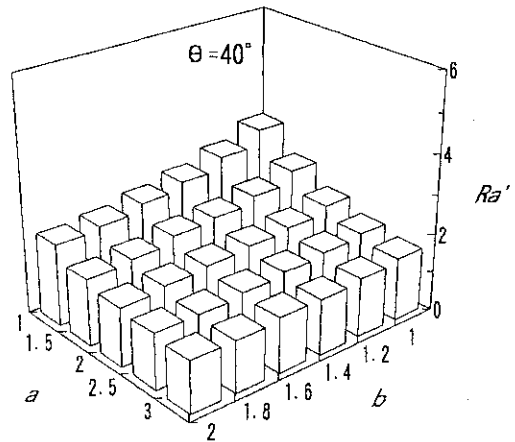
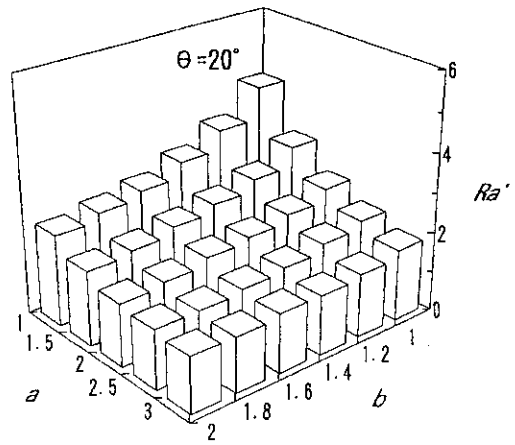


図-11 陽樹冠形状関数のパラメータと陽樹冠半径との関係(隣接個体と樹冠が接する場合)

図-12 陽樹冠形状関数のパラメータと陽樹冠半径との関係(隣接個体と樹冠が接しない場合)

~2の範囲で、 b は1~1.6の範囲で Ra' の変化が特に大きかった。また枝の角度が大きくなると Ra' は小さくなった。(8)式と(9)式をあわせて考えると、 $Ra' \geq Ra$ の場合に樹冠は隣接個体と接し、 $Ra' < Ra$ の場合は樹冠は隣接個体と接しあわない。陽樹冠形状関数のパラメータは Ra と Ra' との両方に影響するので、パラメータは樹冠のうっぺい状態に影響するといえる。このように陽樹冠形状関数のパラメータは森林の管理方法を考える上で重要な意味を持つと言える。

4.1.2 陽樹冠形状関数の森林内変動

陽樹冠形状関数と個体サイズとの関係を把握するために、(6)式のパラメータと樹高との関係をプロットごとに調べた(図-13, 14)。パラメータ b はスギ、ヒノキともに1と2の間に分布した。すなわち、多くの場合陽樹冠の形状は(4)式と(5)式の間の性質を持つ。梶原⁽²⁴⁾は陽樹冠の形状を「円錐体から放物線体にかけてのいろいろの膨らみのものがみら

れる。」としているが、これは今回の結果と一致する。パラメータ a 、 b ともに樹高とあきらかな関係が認められなかった。陽樹冠の形状が個体のサイズにあまり影響を受けないことは梶原⁽²⁵⁾も認めている。

次に陽樹冠形状関数が林内のマイクロな密度環境に影響されるのではないかと考えて、隣接木との個体間距離の平均値とパラメータとの関係を調べた(図-15, 16)。パラメータ a 、 b とも隣接木との個体間距離に無関係であった。陽樹冠は隣接個体と枝先が接しあう部分より上部の部分であり、隣接個体の影響を受けにくいために、陽樹冠形状とマイクロな密度環境に関係がみられなかったと考える。このように個体サイズやマイクロな密度環境と陽樹冠の形状に関係がなかったことで、モデルを構築する際に、個体の大きさや間伐の有無に関係なしに陽樹冠形状関数を設定することができる。

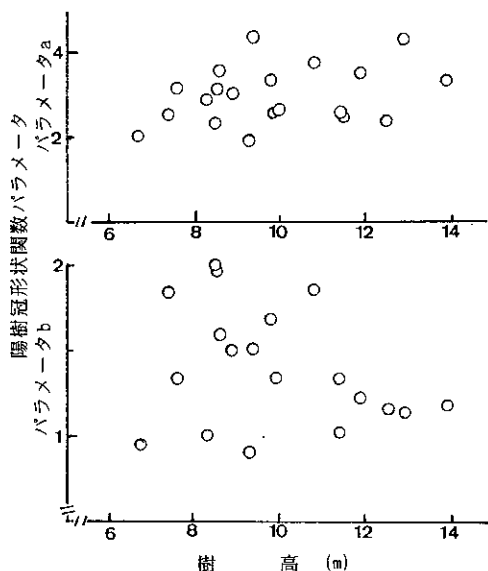


図-13 陽樹冠形状関数のパラメータと樹高の関係 (スギ)

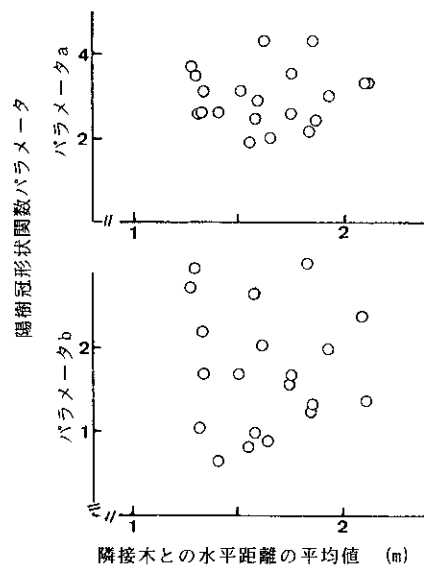


図-15 陽樹冠形状関数のパラメータと隣接個体間距離の平均値の関係 (スギ)

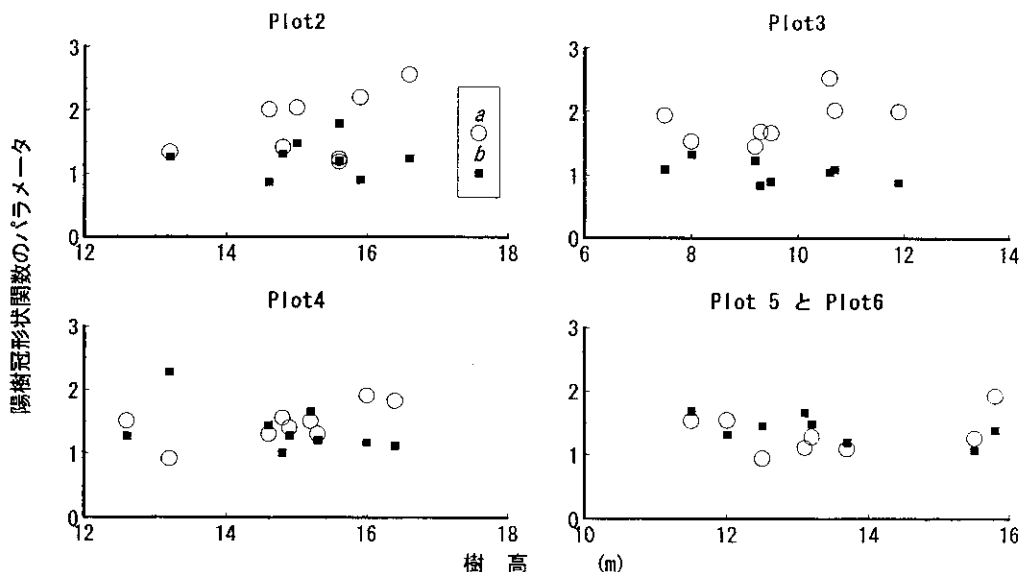


図-14 陽樹冠形状関数のパラメータと樹高の関係 (ヒノキ)

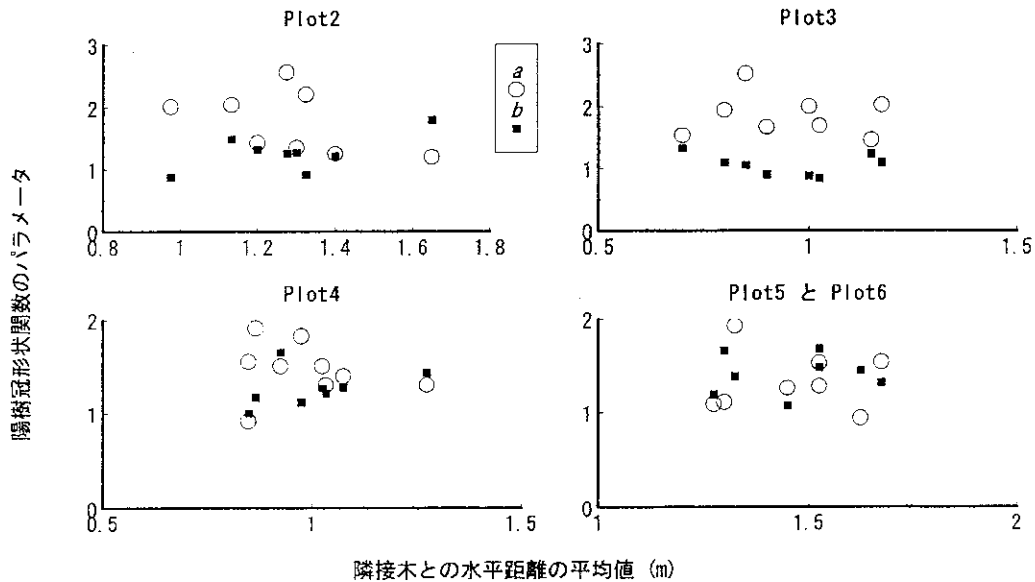


図-16 陽樹冠形状関数のパラメータと隣接個体間距離の平均値の関係 (ヒノキ)

4.1.3 陽樹冠形状関数の樹齢による変化

ねらい

樹冠形状は品種によって違いがみられ^(25,55), Pulkkinen⁽⁶⁸⁾ はエンゲルマンズプルースについて著しく樹冠の細い品種があることを指摘しており、ヒノキについても同様の品種があることが報告されている⁽⁸⁴⁾。さらに樹冠の細いヒノキが地域的な広がりをもって分布することが報告されており^(53,58)、立地環境や地域によって樹冠形状が変化すると考えられる。また樹冠の形状は樹齢^(24,26,79,80)によって変化することが知られている。このように、樹冠形状は品種、立地条件、地域、樹齢など森林の違いによって違いがみられる。これらすべての要因について陽樹冠形状関数のパラメータの違いを調べることはできなかったため、樹齢との関係に限って調べた。

材料と方法

表-1の調査対象林において次の方法で樹冠形状の調査を行った。スギ林についてそれぞれの林で平均的な生育を示している個体を1本選び伐採し、図-8の方法で樹冠形状を測定した。ヒノキ林については、それぞれの森林で平均的な生育を示す個体、平均よりあきらかに大きい個体、平均より明らかに小さいが被圧されていない個体を1個体ずつ選び、陽樹冠上から5~10点の任意の高さの樹冠幅を清水ら⁽⁶⁰⁾の方法で測定し、(6)式の陽樹冠形状関数を計算した。

また、本調査との比較の目的で、梶原⁽²⁸⁾のヒノキの樹冠形状測定データを(6)式にあてはめパラメータを計算した。これらの陽樹冠形状関数のパラメータとプロットで測定した陽樹冠形状関数のパラメータとあわせて樹齢との関係を解析した。

結果と考察

(6)式のパラメータ b は樹齢とのあきらかな関係が認められず、スギの場合平均が1.30で、ヒノキの場合平均1.38であった(図-17, 18)。一方、パラメータ a は、スギの場合樹齢が大きくなるにしたがって小さくなった。これは一般に樹木の樹齢がすすむにつれて樹冠の先端は丸くなるこ

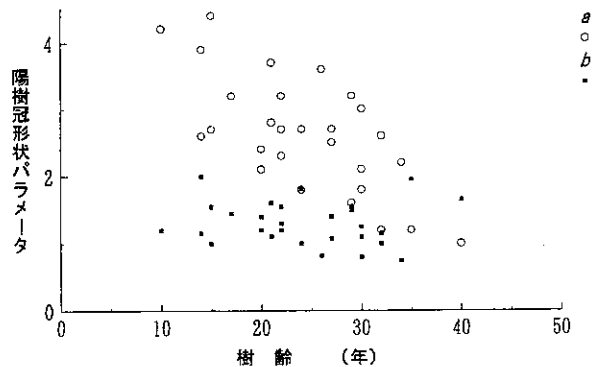


図-17 陽樹冠形状関数のパラメータと樹齢の関係 (スギ)

と^(24,26,79,80)と一致している。ヒノキでは樹齢が若いときにパラメータ a は樹齢とともに小さくなったが、30年以上になるとその変化は緩やかであった(図-18)。ヒノキについて、ここで見られた傾向が一般的かどうかを調べるため、梶原の測定データ⁽²⁸⁾を(6)式にあてはめて今回の測定結果と比較した。この場合もパラメータ b は樹齢によって変化せず、樹齢が若いときのパラメータ a は樹齢とともに小さくなり、本調査の結果と一致した。

個体の陽樹冠形状関数の林内変動を無視できなかったため、本モデルでは個体の陽樹冠の形状を確率的に表現するため、パラメータに乱数を与えることにした。この場合、乱数となるパラメータの数は少ない方が処理しやすい。 b は個体サイズや個体間距離のみではなく、樹齢に対しても不変であったため、 b の平均値を使って、スギの場合 $b = 1.30$ 、ヒノキの場合 $b = 1.38$ で不変であるとして(6)式に代入して、パラメータ a を再計算した。この曲線の相関係数はほとんどの個体で0.85以上であった⁽⁴⁹⁾。Plot 1 (スギ) のパラメータ a の頻度分布は平均2.60で標準偏差0.48の正規分布に近似できた(図-19)ヒノキの場合、9年から10年まで、10年から20年まで、20年から30年まで、30年以上の4グループ

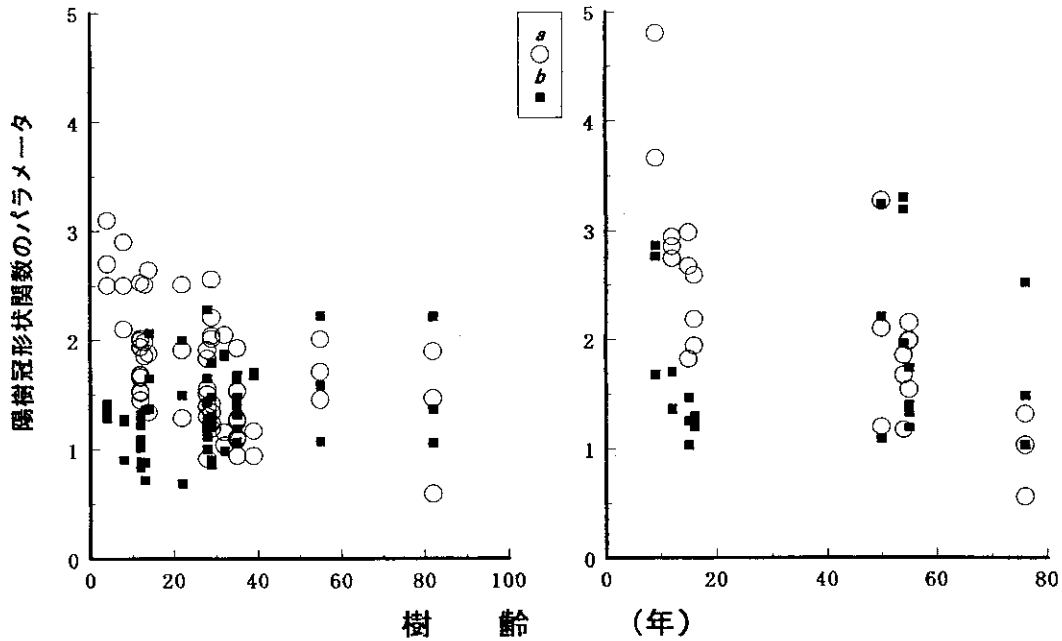


図-18 陽樹冠形状関数のパラメータと樹齢の関係 (ヒノキ)
 左: 本調査のヒノキの陽樹冠形状関数パラメータ
 右: 梶原 (28) のデータから計算したヒノキの陽樹冠形状関数パラメータ

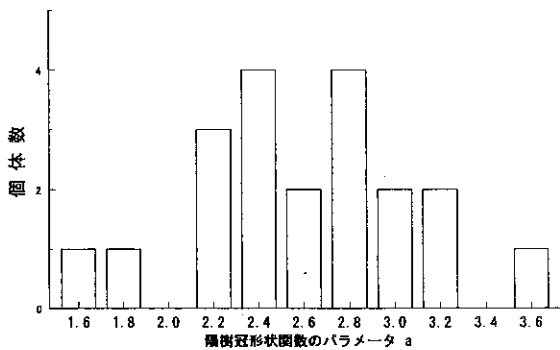


図-19 陽樹冠形状関数パラメータ a の頻度分布 (スギ)

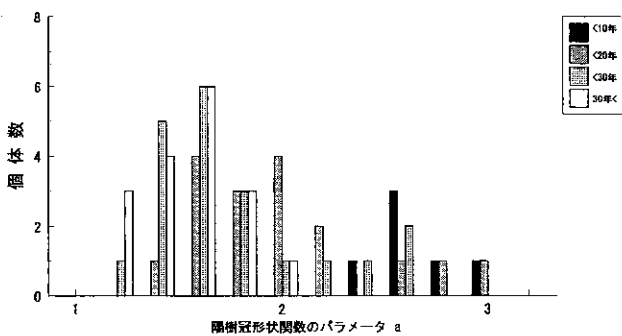


図-20 陽樹冠形状関数パラメータ a の頻度分布 (ヒノキ)

にわけると、樹齢が進むにつれパラメータ a は平均2.33から平均1.44まで小さくなった (図-20)。そこで、シミュレーションモデルで使用する個体ごとの陽樹冠形状関数のパラメータを次のように定めた。Plot 1の場合、陽樹冠形状関数のパラメータ a を平均2.60で標準偏差0.48を持つ正規型乱数で求め、パラメータ b を1.30であるとした。Plot 2

から7までの場合、個体の陽樹冠形状関数のパラメータ a はその林齢が該当する樹齢のグループの平均値と標準偏差を持つ正規型乱数で計算し、パラメータ b を1.38であるとした。

4.2 陽樹冠下部の枝の形状と成長

4.2.1 枝の角度

ねらい

図-12であきらかなように、樹冠が隣接個体と接しない状態の場合、枝の形状は陽樹冠半径に大きな影響を及ぼす。そこで、陽樹冠を構成する枝について枝の角度を調べた。

材料と方法

Plot 1 ~ Plot 7で陽樹冠形状を測定した個体の陽樹冠を構成する枝について、枝の付け根から枝先までの高低差と水平幅の比率 (枝の角度を θ とした時の $\tan \theta$ であり、以下枝の $\tan \theta$ と呼ぶ) を測定した。

結果と考察

堤⁽⁹³⁾は、枝の角度は1個体のなかでも付着位置により異なり、梢端部の若い小さな枝で大きく、幹の下方に向かって次第に小さくなると述べている。そこで、梢から枝の付け根までの距離と枝の $\tan \theta$ の関係を調べた。スギの場合、梢端部では他の部分より大きい傾向が見られたが、梢からの高低差が2 m より大きくなると両者に明瞭な関係は見られなかった (図-21)。ヒノキの場合、幹上のどの位置でも両者に明瞭な関係は見られなかった。

枝の角度が陽樹冠半径に影響を及ぼすような個体は、他の個体と枝が接しあわない個体である。このような個体は、十分な生育空間があると考えられるので陽樹冠長は通常2 m 以上であると考えられる。すなわち枝の角度が陽樹冠半径に影響を及ぼすような枝は梢からの高低差が2 m より大きいところに位置する枝であると考えた。梢からの高低差が2

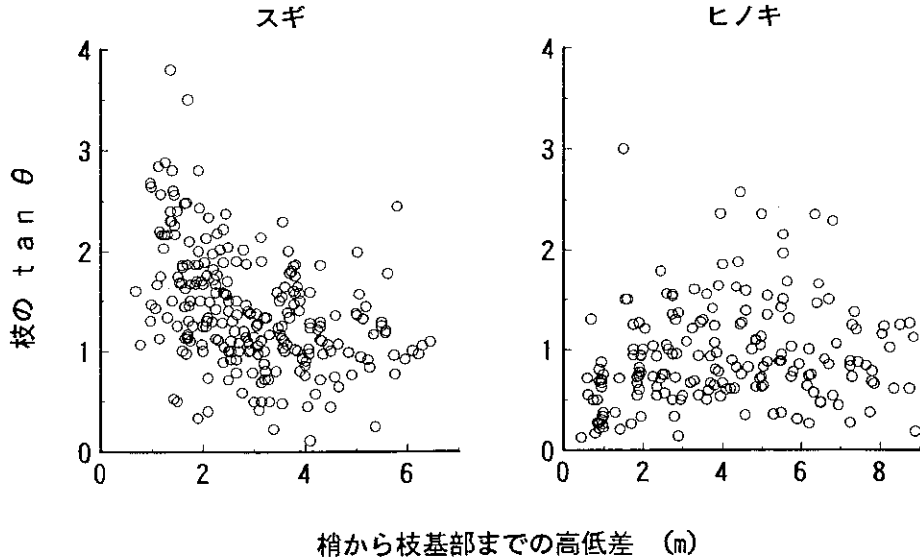


図-21 梢から枝の付け根までの高低差と枝の $\tan\theta$ の関係

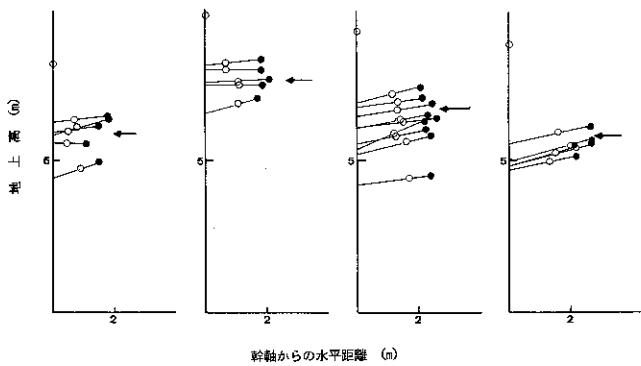


図-22 隣接個体が間伐された個体の間伐後4年間の枝の伸長成長
 白丸：間伐前の枝先の位置、黒丸：伐後4年目の枝先の位置、矢印：間伐前に陽樹冠基部であった部分の高さ。

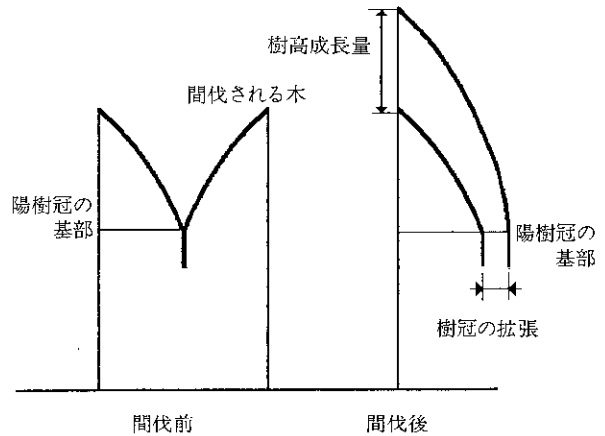


図-23 間伐前後の陽樹冠の基部の高さの変化の概念

mより大きいところに位置する枝の $\tan\theta$ の平均値はスギが1.1でヒノキが0.9であった。シミュレーションモデルで使用する個体の枝の $\tan\theta$ はそれぞれの樹種の平均値とした。

4.2.2 間伐後の樹冠下部の枝の成長
 ねらい

間伐後の林冠の形状の変化を予測する場合、隣接個体の樹冠が失われることで間伐後に生じた林冠の孔に向かって残存個体の樹冠下部の枝がどのように成長するかを知ることが重要である。そこで、樹冠下部の枝の間伐後の成長を調べた。

方法

Plot 3で間伐個体に隣接する残存個体を4個体選んだ。この個体について間伐前に間伐個体と樹冠が接触する部分の高さを測定し陰樹冠と陽樹冠の境界を定めた。間伐4年後に、間伐個体の位置する方向の枝を選び、枝先の地面からの高低差と枝の付け根の地面からの高低差を測定した。その後、枝の付け根から枝を切断した。切断した枝を枝先から20cmごとの材片に切断して年輪を数えて、間伐後4

年間の伸長成長量を測定した。

結果と考察

間伐後4年間の枝の伸長成長量はほぼ1mであった。間伐前に陰樹冠であった枝は陽樹冠であった枝よりやや枝の伸長成長量が小さい傾向はみられるものの大きな違いは見られなかった(図-22)。すなわち、間伐前に陰樹冠であった枝の4年後の r (幹軸から枝先までの水平距離) が陽樹冠であった枝に比べて大きくなることはなかった。陰樹冠部であった枝は間伐によって光条件が改善されたといっても、真上の枝に被陰されるため陽樹冠だった枝に比べると光条件は良いとはいえず、陽樹冠だった枝の伸長成長量より大きくなることはなかったと考えられる。このことから本モデルでは、間伐前に隣接個体と樹冠が接触していた部分より下部(陰樹冠に相当)では、間伐によって隣接個体を取り除かれても陽樹冠であった部分を上回る樹冠の拡張はないと仮定した(図-23)。このため、過去に陰樹冠であった部分が間伐によって隣接個体を取り除かれ、樹冠が接しあわなくなった場合を陽樹冠と呼ぶことは問題があるので、2.2で定義したように、この場合を陽樹冠とはしな

った。したがって、この仮定に従えば、陽樹冠の基部の高さは間伐後に隣接個体を取り除かれても低くならないこととなる。間伐後に陽樹冠の基底部の高さの林分平均値が変化しないことが裾原によって確かめられており⁽³⁰⁾、この仮定の妥当性を示唆する。

4.3 樹冠内の葉の分布状態

4.3.1 ねらい

幹軸上の任意の位置の非同化器官の単位長あたりの重量と、梢端からその位置まで積算した葉重量の間にはパイプモデルが成り立つことが知られており^(65,82,83)、葉の垂直分布状態は幹の成長量に深い関係がある^(9,31,67)。また林内の任意の地点の光環境は葉の分布状態に強く影響される⁽¹⁰⁰⁾。このように、葉の分布状態は本モデルを構成する重要な要素である。

樹冠の状態から着葉重量を求める場合、葉が樹冠内で均一に分布するものと仮定して、樹冠サイズ（樹冠表面積、投影面積、あるいは体積など）と個体葉重量の関係を直接求めることがある^(20,27,28,45,78)。しかし葉の分布状態は同一樹冠内で均一ではなく、水平的にも垂直的にも大きな変位があることが知られている^(42,43)。このため、樹冠内の葉の分布状態を知ることは重要であると考えられる。

樹冠内の葉の三次元分布状態の測定には多大の労力を要するため過去の測定例は少ない^(16,43)。そこで、スギ、ヒノキの葉重量密度の三次元位置による変化を過去の測定方法⁽¹⁶⁾に改良を加えて簡易に測定し、陽樹冠形状との関連で示される関数を用いて表示した。

4.3.2 材料と方法

Kurachi ら⁽⁴³⁾はさいのめ切り法によってカラマツの葉の三次元分布を測定した。この手法は精度の高い方法であるが、多大の労力を必要とする。ここでは平野⁽¹⁶⁾が提唱したカンキツ類における着葉分布の簡易測定方法を改変して、次の方法により着葉分布状態を測定した⁽⁵⁰⁾。岡山県林業試験場構内のスギ林23年生から4本の個体とヒノキ林35年生から4本の個体を伐採した。伐採したヒノキ個体のうち1個体は周囲の個体より著しく小さい劣勢木であった。

伐採した個体を梢から1mの短材ごとに切断し、枝葉を付けたまま材を地面に垂直に立てた。幹軸を中心として45度の角度ごとに外に向かって8本の半直線を地面に描いた。その半直線上で鉛直になるように測量ポールを立て、0.2m間隔で階層区分し、各層について葉軸がポールに付着する回数を数えて、その数をその層の葉数指数⁽¹⁶⁾とした。このとき枝が下に垂れ下がり、地面に葉が接するような場合はきわめて少なかったため、このような葉は無視した。測量ポールは半直線上を幹軸の中心から0.1m, 0.3m, 0.5m, ……と外に向かって0.2mずつ動かして測定を繰り返した。任意の位置（幹軸からの水平距離が r 、短材の元口からの高低差が lh 、半直線の順番が j 番目）の葉数指数は、その位置にある空間、すなわち、半径が r で水平方向の幅が0.2mで垂直方向の厚さが0.2mのドーナツ型空間を8等分した空間の平均的な葉の分布状態を示すと考えた（図-24）。

全ての半直線について葉数指数を測定した後、短材毎に全ての葉を採取し生重量を測定した。採取した葉の中から

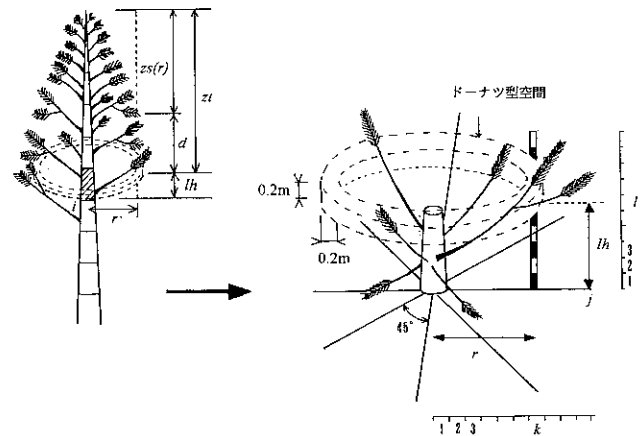


図-24 着葉分布密度の測定方法

点線で囲まれた部分は幹からの水平距離が r m で測定する短材の元口からの高低差が Lh m のときのドーナツ型空間を示す。

一部の試料を実験室に持ち帰り80度の温風乾燥器で試料を乾燥して含水率を求め、短材ごとの葉重量を推定した。なお葉と枝は緑色を呈しているかどうかで区分した。

次に幹軸からの水平方向の違いによる葉の分布の片寄りを無視して、ドーナツ型空間別に平均して、短材ごとに半径別、元口からの高低差別の葉重量密度を(10)式により計算した。

$$Ldt(r, lh, i) = Lw(i) \sum_{j=1}^8 Nlt(r, lh, i, j) / \sum_{k=0}^8 \sum_{l=0}^8 \sum_{j=1}^8 (0.01\pi r Nlt(r, lh, i, t, j)) \quad (10)$$

$Ldt(r, lh, i)$: i 番目の短材で半径 r で元口からの高低差 lh のドーナツ型空間の平均葉重量密度 ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ; $Lw(i)$: i 番目の短材に付着した葉重量 (Kg) ; $Nlt(r, lh, i, j)$: i 番目の短材について半径 r で元口からの高低差 lh の位置で j 番目の半直線の葉数指数 ; k : ドーナツ型空間の中心からの順番で、幹軸からの半径 r との間に $r = 0.2 \cdot k - 0.1$ の関係がある ; l : ドーナツ型空間の元口面からの順番。 lh との間に $lh = 0.2 \cdot l - 0.1$ の関係がある ; i : 梢から数えた短材の順番。短材の長さが1mなので、 i は梢から短材の元口までの距離 (m) も示す。

次に個体全体について考える。梢からの高低差が zt m で半径が r m のときのドーナツ型空間には、その高さにある短材に付着した枝の葉だけではなく、その高さより下層の短材に付着した枝の葉も含まれる。そこで梢からの高低差が zt m で半径が r m の葉重量密度を(11)式により計算した。

$$fd(r, zt) = \sum_{i=zt}^{Hint} Ldt(r, i-zt, i) \quad (11)$$

$Hint$: m 単位で表した樹高の整数部分の値 ; $fd(r, zt)$: 幹軸からの半径 r m で、梢から zt m の距離にあるドーナツ型空間の平均葉重量密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

さらに、樹冠表面から垂直方向に $fd(r, zt)$ を積算して、樹冠表面からの距離 d 別の単位面積当たり積算葉重量密度

$Fd(r, d)$ を(12)式で求めた (図-25)。

$$Fd(r, d) = \sum_{m=(zs(r)+0.1)/0.2}^{(zs(r)+d+0.1)/0.2} fd(r, zt) \quad (12)$$

$Fd(r, d)$: 幹軸からの半径 r で、樹冠表面からの高低差 d の位置より上方にある厚さ d のドーナツ型空間の単位面積あたり積算葉重量密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) ; $zs(r)$: 半径 r のときの梢から樹冠表面までの高低差 (m) ; m : ドーナツ型空間の梢からの順番で、梢からの距離 zt との間に $zt = 0.2 \cdot m - 0.1$ の関係がある。

平野⁽¹⁶⁾のカンキツ類に関する簡易測定例では、葉数指数と葉面積密度の実測値の間に高い相関が認められている。

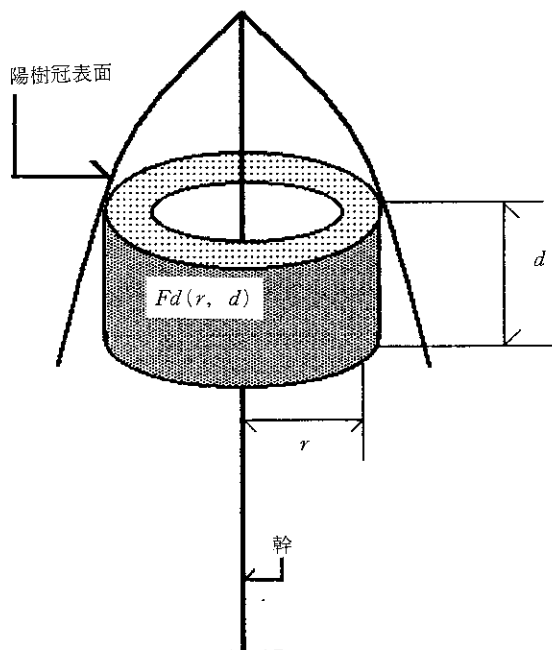


図-25 単位面積あたり積算葉重量密度 $Fd(r, d)$ の説明
 $Fd(r, d)$ は図中のドット部分の単位投影面積あたり葉重量密度を意味する。

スギ、ヒノキについてはこのような簡易測定例がなく精度については不明である。そこで同一林分の他のスギ個体について、樹冠頂部 (梢からほぼ3 m の位置まで) を実際にドーナツ状に切りとって測定した葉重量密度と今回の測定値とを比較したところ大きな差が認められなかったので(図-26)、ほぼ測定値は妥当なものと考えた。

4.3.3 結果と考察

Oker-Blom⁽⁶³⁾はロジポールパインで樹冠内で葉が規則分布することを予測した。また倉地⁽⁴²⁾はカラマツの葉の水平的な分布について、単位面積あたりの垂直方向の積算葉重量は幹から離れるほど小さくなり、幹を中心として正規分布関数と同じ形をした山型分布をすることを報告した。Hashimoto⁽¹⁴⁾は葉の垂直分布を梢端からの距離とのアロメトリックモデルで表わした。本論文では葉の三次元分布状態を解析するため、樹冠内の任意の位置を幹からの水平距

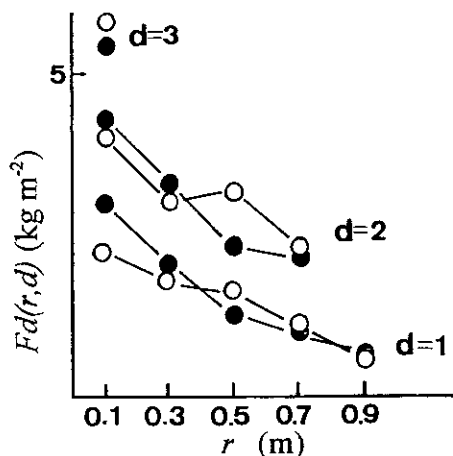


図-26 $Fd(r, d)$ の測定方法別の比較
 黒丸はドーナツ空間ごとに直接切り取って調べた値 (3 個体の平均値)、白丸は平野の方法 (改変) による測定値 (4 個体の平均値)。両者は95%レベルで有意差が認められなかった。

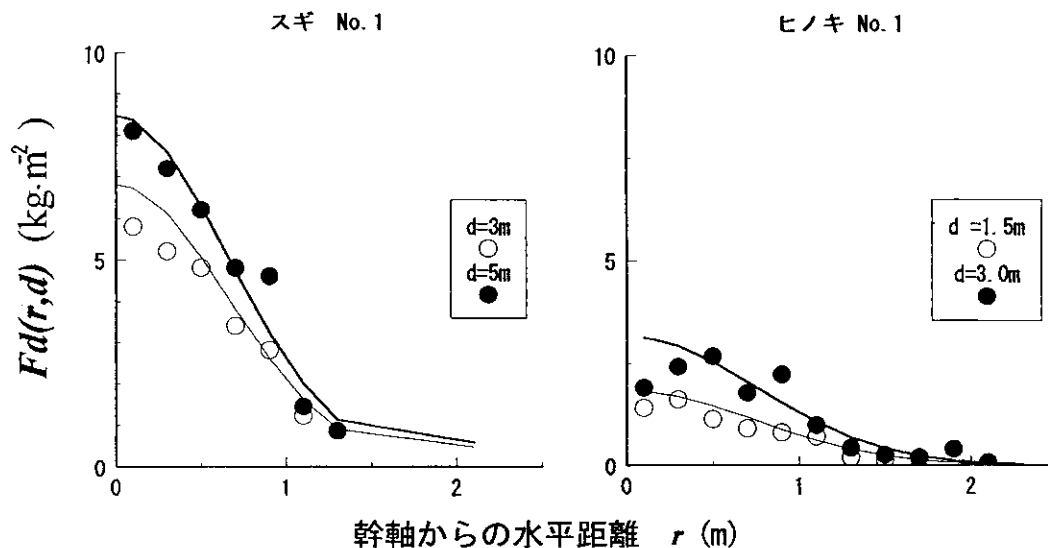


図-27 $Fd(r, d)$ と r の関係
 図中の線はそれぞれの d のときの13式による推定値曲線を示す。13式のパラメータは表-4 による。

離 r 及び樹冠表面からの高低差 d であらわし、この位置のドーナツ型空間の単位面積あたり積算葉重量 $Fd(r, d)$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) と r, d の関係を調べた。

d が一定の時の $Fd(r, d)$ は r が大きくなるほど小さくなり、幹を中心とする山型の分布をしており (図-27)、倉地⁽⁴²⁾のカラマツに関する報告と一致した。一方、 r が一定の時の $Fd(r, d)$ は d が大きくなるほど大きくなった (図-28)。ただし、その増加程度は d が大きいほど小さく、ヒノキ No. 1 の例の場合 $d = 3\text{m}$ で $Fd(r, d)$ はほぼ一定となった。

以上のように $Fd(r, d)$ は r と d によって変化したので、 r と d の二変数で表される(13)式で回帰した。

$$0 \leq d \leq -\frac{\gamma}{\beta} \text{ のとき,}$$

$$Fd(r, d) = \exp(\alpha - ar^2 + \beta d + \gamma \ln(d)) = d^{\gamma} \exp(\alpha - ar^2 + \beta d)$$

$$d > -\frac{\gamma}{\beta} \text{ のとき,}$$

$$Fd(r, d) = \left(-\frac{\gamma}{\beta}\right)^{\gamma} \exp(\alpha - ar^2 - \gamma) \quad (13)$$

$\alpha, \beta, \gamma, \alpha$: パラメータ

もし d が一定の場合は $Fd(r, d)$ は(14)式で示され、倉地⁽⁴²⁾がカラマツの着葉分布で示した式と一致する。

$$Fd(r, d) = \exp(\epsilon - ar^2) \quad (14)$$

一方、 r が一定の場合には(15)式の Hashimoto⁽¹⁴⁾ のアロメトリック式で表される。

$$0 \leq d \leq -\frac{\gamma}{\beta} \text{ のとき, } Fd(r, d) = d^{\gamma} \exp(\delta + \beta d) \quad (15)$$

このように(13)式の $Fd(r, d)$ は水平方向では正規分布に似た幹を中心とする山形の分布形を示し、垂直方向では

Hashimoto⁽¹⁴⁾ のアロメトリック式で表される分布形を示した。

ここで、 $Fd(r, d)$ を d により偏微分すると、 r, d の位置の微少なドーナツ空間の単位体積あたりの葉重量密度 $fdd(r, d)$ (kgm^{-3}) を(16)式で求めることができる。この(16)式を着葉分布密度関数とする。

$$0 \leq d \leq -\frac{\gamma}{\beta} \text{ のとき,}$$

$$fdd(r, d) = (\gamma + \beta d) d^{\gamma-1} \exp(\alpha - ar^2 + \beta d)$$

$$d > -\frac{\gamma}{\beta} \text{ のとき,}$$

$$fdd(r, d) = 0 \quad (16)$$

(16)式より、樹冠表面からの高低差が $-\gamma/\beta$ より大きくなると葉が分布しないことがわかる。表-4 に着葉分布密度関数のパラメータを示す。ヒノキの場合 $-\gamma/\beta$ が 3 ~ 4 m で、スギの場合 $-\gamma/\beta$ が 5 ~ 7.5 m であった。実際の林分では「陽樹冠の下に、ほぼ一定長の陰樹冠」があり⁽²⁵⁾、その下部には葉は存在しない。このような点から考えると、個体内で葉が分布する最下部の高さは陽樹冠の基部から下方向への距離に影響されるものと考えられる。梶原^(24~26,28)の調査報告例では、陰樹冠長はほぼ 2 ~ 3 m であった。Plot 1 の陰

表-4 着葉分布密度関数のパラメータ

樹種	番号	α	β	γ	相関係数	陽樹冠半径
スギ	1	1.19	-0.20	1.21	0.96	1.6
	2	0.80	-0.22	1.43	0.95	1.5
	3	0.99	-0.35	1.80	0.91	1.3
	4	0.45	-0.25	1.85	0.94	2.1
ヒノキ	1	0.60	-0.52	1.92	0.90	2.5
	2	0.90	-0.40	1.24	0.92	1.7
	3	0.80	-0.45	1.31	0.86	2.8
	4	1.48	-0.64	1.92	0.97	1.2

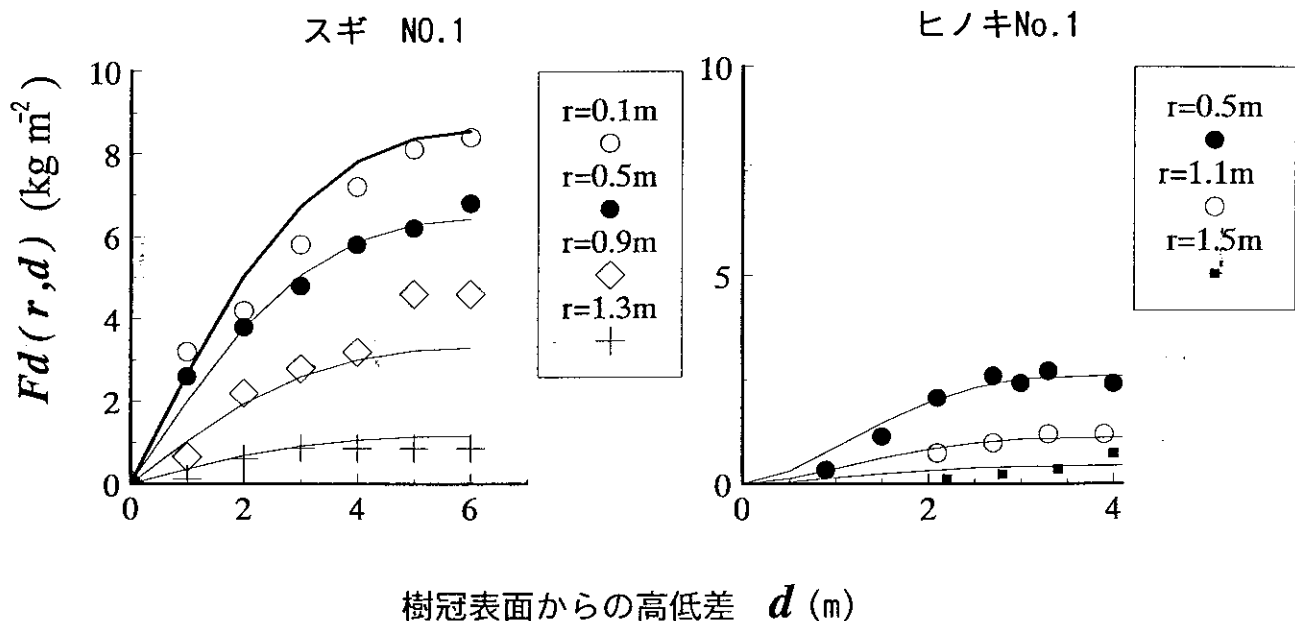


図-28 $Fd(r, d)$ と d の関係

図中の線はそれぞれの r のときの13式による推定値曲線を示す。13式のパラメータは表-4による。

樹冠長は平均2.05mで岡山県林業試験場構内のスギ林、ヒノキ林での陰樹冠長はそれぞれ平均2.2m, 2.5mであった。こうした点から隣接個体と樹冠が接触している場合、陽樹冠基部より2m下の位置を着葉の下限位置として、葉は梢から着葉下限位置までに分布するものとして計算した。間伐前に隣接個体と接触しない場合には、枝下高から求められる枝の最下部分の位置を着葉の下限位置と考えた。

着葉分布密度関数のパラメータに個体差が見られたので、陽樹冠半径とパラメータの関係を調べた(図-29)。陽樹冠半径とパラメータ α には有意な相関が見られた($P < 0.05$)が、その他のパラメータと陽樹冠半径には有意な相関は見られなかった。ここでは、パラメータ α と陽樹冠半径の間にべき乗関係があると考えて、(17)式を得た。

ヒノキの場合

$$Fd(r, d) = \exp(0.65 - 4R^{-1.5}r^2 - 0.4d + 1.8\ln(d))$$

スギの場合

$$Fd(r, d) = \exp(0.9 - 2R^{-1}r^2 - 0.23d + 1.46\ln(d)) \quad (17)$$

R: 陽樹冠半径

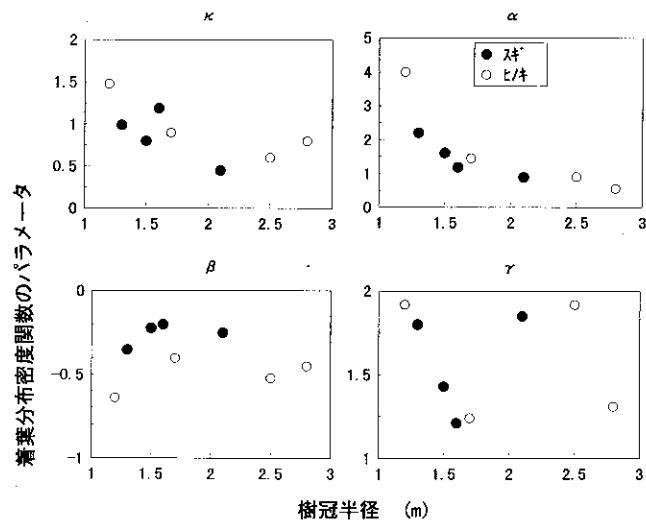


図-29 着葉分布密度関数(13)式のパラメータと陽樹冠半径の関係

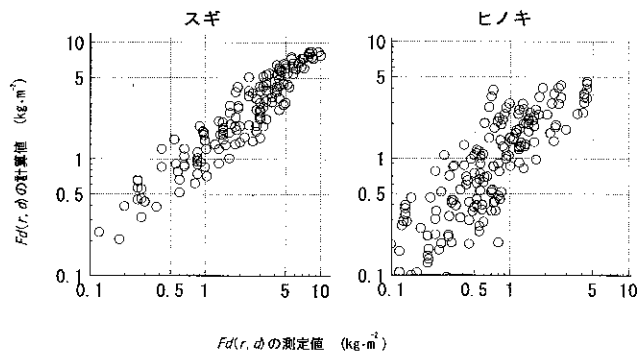


図-30 $Fd(r, d)$ の測定値と(17)式による計算値の関係
左側の図はスギの例で、測定値と計算値の相関係数は0.93であった。右側の図はヒノキの例で、測定値と計算値の相関係数は0.91であった。

(17)式による $Fd(r, d)$ の計算値と測定値の関係を求めたところ(図-30), 1:1の直線上にあり相関は高かった。

4.4 葉の幹材積生産効率

4.4.1 測定方法

Chibaら⁽⁹⁾は梢から zt の位置のときの幹の単位長あたりの重量成長量とその上方の葉の積算葉重量が比例すると仮定している。ここで、幹の容積重が一定であると仮定すると、ある時点の任意の位置の単位長あたりの材積成長量と積算葉重量との関係は次式で表現できる。

$$\Delta v(zt) = \mu v F(zt) \quad (18)$$

$\Delta v(zt)$: 梢からの高低差が zt のときの単位長あたりの材積成長量 ($\text{m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$); $F(zt)$: 梢からの高低差が zt のときの梢までの積算葉重量 (kg); μv : 単位重量の葉が単位長あたりの材積を生産する効率 ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$) で、葉の幹材積生産効率。

そこで、それぞれのプロット内で樹冠形態を測定した間伐木の一部について、幹を梢から1mの短材ごとに切断し、年輪解析用の試料を採取した。年輪解析用の試料は表面をサンダーで磨いた後、最大直径を持つ方向とそれに直交する方向に線分を描いて、中心から4方向に1年ごとに印を付けた。これをコピー機で白用紙に複写して、デジタイザによりそれぞれの試料の中心からの距離を読みとった。この場合、複写に伴う長さの誤差は0.5~1%であり、幹材積の計算に大きな影響を及ぼさないことを確認した。それぞれの短材の材積および個体の材積は従来⁽²³⁾により計算した。 $\Delta v(zt)$ は試料採取時の直前3年間の年平均材積成長量に等しいとした。またそれぞれの短材に付着するすべての葉を採取し短材ごとの乾燥葉重量を求めた。ただし、Plot 1の場合、19個体の年輪解析をしたが、短材ごとの葉重量を測定したのは7個体のみである。

これらの個体について、梢から zt の距離の位置より上方の積算葉重量の実測値と単位長あたりの材積成長量の関係を原点を通る直線で回帰し傾きを求め、葉の幹材積生産効率 μv とした。

4.4.2 結果と考察

μv を求めるための回帰式の相関係数は全ての個体で0.75以上で、全体の85%は0.90以上と高かった。

Osawa⁽⁶⁶⁾はカラマツの幹材積生産効率 μv の経時変化を推定し、樹齢が若いうちは大きく個体によるバラツキも大きいことが報告した。今回の測定結果においてもほぼ同様の傾向が見られた(図-31)。すなわち、20年生より若いPlot 3の μv は他の林より大きかったが、樹齢が20年生以上のプロットでは μv が $1.0 \sim 1.6 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ の範囲と小さく一定の値に近づいた。本モデルでは材積成長量を推定するため、Plot 1と3はそれぞれの林内の μv の平均値 1.26×10^{-4} , $2.22 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ を使い、Plot 2, 4, 5, 6, 7は樹齢20年生以上のヒノキ林で得られた全個体の μv の平均値 $1.16 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ を用いた。

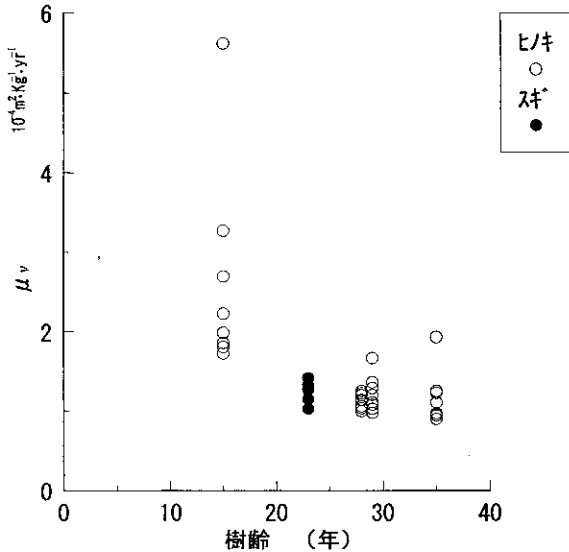


図-31 葉の幹材積生産効率 μv と樹齢の関係

第5章 林冠動態モデルの構築と検証

5.1 ねらい

第4章で述べてきたモデルの構成要素を用いて、間伐が個体の着葉分布、幹材積成長量、林床の光環境に及ぼす影響を予測するため、間伐後の林冠の孔が修復される過程を推定する林冠動態モデルを構築した^(49,50)。このモデルを用いて間伐方法別の効果を評価するためには、モデルの予測精度を把握しておく必要がある。このため、本章ではモデルの構築方法について説明し、実際に間伐を行ったプロットに林冠動態モデルを適用して、間伐後の個体の幹材積成長量や林床の光環境の変化を予測し、プロットから得られた実測値と比較して検証した。

5.2 モデルの組立て

5.2.1 個体の着葉分布構造と幹材積成長量の予測

本モデルでは以下の手順によって林冠表面の形状、着葉分布状態、材積成長量を推定した。計算のフローチャートを図-32に示す。

- ① それぞれのプロットで図-6の点Oを原点(0, 0, 0)とした三次元空間(図-4)を想定する。三次元空間のXY平面を0.2mメッシュに区切り、任意のメッシュの中心の座標を(x, y, 0)とする。
- ② 仮に個体*i*の樹冠が(x, y, 0)の上空を通過するとき、樹冠上の点(x, y, pi')は(1)式と(6)式から(19)式により計算できる。

$$pi' = Zi - a((Xi - x)^2 + (Yi - y)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

このときの pi' は(2)式を満足する必要がある。 pi' を個体*i*の(x, y, 0)に対する仮の樹冠高とし、プロット内の全ての個体について仮の樹冠高を求めた。

③ プロット内の全ての個体について求めた仮の樹冠高のうち最大値を持つ個体の樹冠がメッシュ(x, y, 0)の上空を覆う(以下、「メッシュを占有する」と呼ぶ)ものとして、仮の樹冠高の最大値をメッシュ(x, y, 0)の上空の林

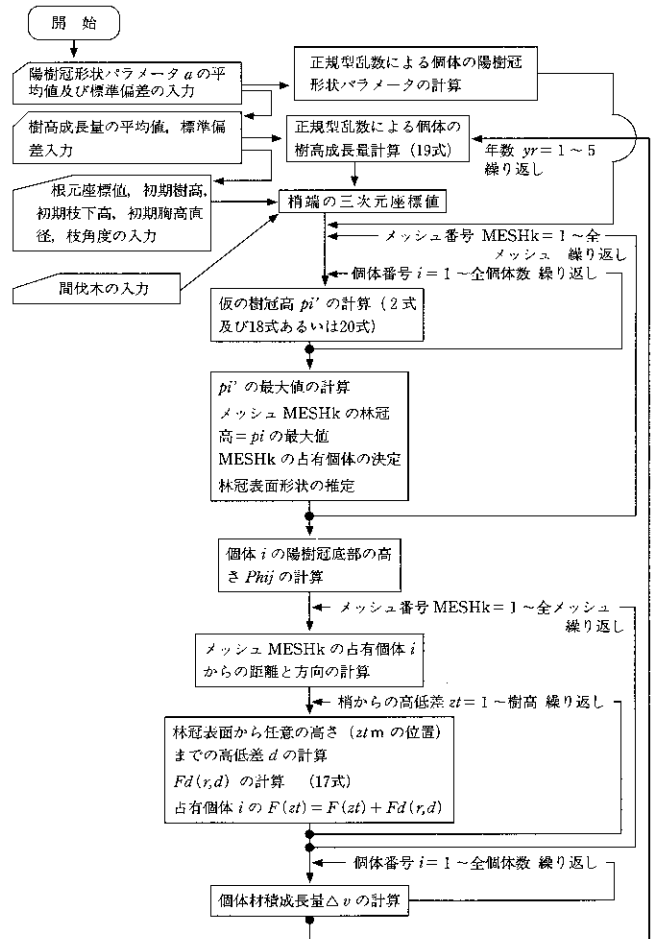


図-32 材積成長量推定のためのモデルの流れ

冠表面の高さとした。ただし全ての個体で(2), (19)式を満足しなかった場合、そのメッシュを占有する個体はなく、そのメッシュは林冠の孔であると考えた。

④ プロット内のXY平面のメッシュ全てについて林冠表面の高さを計算した後、各個体ごとに占有するメッシュを抽出した。個体*i*の根元位置をXY平面に投影した点($Xi, Yi, 0$)を中心としてX軸方向から順に等角度で20方向に仮定の半直線を描いた。個体*i*が占有するメッシュのうち*j*ライン上の中心から最も離れたメッシュの林冠表面の高さを、個体*i*の*j*ライン方向における陽樹冠基底の高さ $Phiij$ とした。

⑤ シミュレーション開始年の林冠の形状(各メッシュの占有個体と林冠の高さ)は手順①から④までの過程で求めることができる。その後の個体の樹冠は樹高成長に伴って変化する。仮定4で述べたように、個体の樹高成長量は林分の平均樹高成長量と樹高の標準偏差の正規分布型乱数で計算した。したがって2年目以降について次式で得られた Hi を(19)式に代入し、各メッシュの林冠の高さと占有個体を求めた。

$$Hi = Hpi + mdh + sdh \left(\sum_{k=2}^{12} xk - 6 \right) \quad (20)$$

Hpi : 前年の樹高, mdh : 平均樹高成長量, sdh : 樹高成長量の標準偏差, xk : 0から1までの値を示す乱数。

表-5 モデルに入力する樹高成長量

Plot 名	平均値 (m)	標準偏差 (m)
Plot 1	0.45	0.13
Plot 2	0.28	0.14
Plot 3	0.65	0.15
Plot 4	0.51	0.06
Plot 5, 6, 7	0.40	0.05

20式の場合、個体の樹高成長量がマイナスと計算される場合があります、不都合なので、この場合はその個体について再度計算を行い、樹高成長量がプラスとなるようにした。

平均樹高成長量および樹高成長量の標準偏差は、それぞれのプロットの樹幹解析データから過去5年間の連年平均樹高成長量の平均値と標準偏差を求め(表-5)、これを用いた。

⑥ 4.2.2で述べたように、間伐によって隣接個体を取り除かれても陽樹冠の基底部は低くならない(図-24)と仮定した。したがって、個体*i*の*j*ライン方向における樹冠の高さは前年に計算された Phi_j より低くならないので、(2)式のかわりに次式を満足する必要がある。

$$pi' \geq Phi_j \tag{21}$$

この場合、間伐直後の林冠表面の形状は間伐前の林冠形状から間伐木の樹冠が欠如した形として推定される。

⑦ 推定された林冠表面の形状から、つぎの方法でメッシュごとの葉の分布状態を推定した。メッシュとそのメッシュの占有個体の幹までの水平距離を*r*とし、メッシュの林冠表面の高さと任意の地上高との高低差を*d*とすると(17)式を用いて、そのメッシュの任意の地上高の位置の*Fd(r, d)*を計算することができる。そこでメッシュの占有個体の梢の位置から鉛直下方へ1mおきに基準の高さを設けてその高さの*Fd(r, d)*を計算した。個体ごとに占有するメッシュについて、梢からの高低差が*zt*の位置より上方の*Fd(r, d)*を合計して、梢からの高低差*zt*のときの積算葉重量*F(zt)*を求めた。

⑧ 4.3で求めた葉の幹材積生産効率を用いて、個体ごとの積算葉重量*F(zt)*から個体材積成長量を計算した。すなわち、個体材積成長量は(18)式を梢から根元まで積分したものであるから、次式で示される。

$$\Delta v = \mu v \int_0^H F(zt) dz \tag{22}$$

H: 樹高 (m); Δv : 個体材積成長量 ($m^3 \cdot yr^{-1}$)

Osawaら⁽⁶⁷⁾は着葉構造が時間的に一定であると仮定して、幹の成長量が樹冠基部の単位長あたり幹の重量を用いた簡単な式で表されることを示した。樹冠基部の単位長あたりの幹重量は個体葉重量からを求めることができるので、彼らの方法は(22)式よりも簡単に材積成長量を計算することができる。しかし間伐は林冠に孔隙をあけ隣接木の着葉構造に変化を生じさせると考えられるので、着葉構造が一定であると仮定することは無理がある⁽⁶⁹⁾。したがって、間伐が材積成長量に及ぼす効果を予測する場合には Osawa ら⁽⁶⁷⁾

の方法を適用することはできないと考え、本モデルでは(22)式を用いた。ただし、*F(zt)*は解析的な形で得られていないので、*zt*が1mおきのときの*F(zt)*を求め、台形公式により(22)式を近似した。

このモデルによって、個体の根元の三次元座標値→梢の三次元座標値→林冠表面形状→個体の着葉分布状態→個体の幹材積成長量の順で推定した。プログラム言語は Microsoft 社の Visual Basic を用いた。このモデルでは、個体ごとの陽樹冠形状関数パラメータや樹高成長量を正規型乱数を用いて求めた。このようなモンテカルロシミュレーション的手法ではシミュレーションを数回繰り返して、その平均値を表示することが一般的である。そこでシミュレーションを10回繰り返し、その平均値を求めた。

シミュレーションによる推定値は実測値と比較して検証される必要がある。広岡・山田⁽¹⁷⁾はシミュレーションの検証方法として、実測値と推定値の単回帰直線の利用を提唱した。本報告でも推定値と実測値の単回帰直線 $Y = a + bX$ の切片と傾きがそれぞれ0と1であるという帰無仮説を立て、Student の *t* 検定を行った。

5.2.2 林床の光量子束密度の予測

林床の任意の位置に入射する光は枝葉や地面や幹によって遮られるので、林床の植物個体が生育する空間の任意の時刻の明るさは求める空間の周囲の幹や枝葉などの遮光物の分布状態と林外の明るさと太陽の位置によって主に決定される。5.2.1では個体の根元の三次元座標値と樹高を合わせた梢の三次元座標値から林冠の表面形状と林内の全個体の葉の分布状態を推定する方法について述べた。この方法で林内の葉の三次元分布状態が予測できるので、林床の任意の位置の光環境が予測できると考えた。そこで、Plot 2のデータを用いて林床の光量子束密度を梢の三次元座標値から予測するモデルを作成した。

林床の光量子束密度を知るためには、地面や幹の位置と葉の分布状態を把握しておく必要がある。まず、地面の三次元的な位置を次の方法で推定した。各個体が林内にほぼまんべんなく分布しているので、XY平面上に描いた個体位置図と各個体の根元のZ座標をもとにフリーハンドで1mおきの等高線を描いた。等高線ごとにデジタイザーでX軸方向に1メッシュ間隔で(0.2mおきに)Y座標値を読みとった。Y軸方向の地盤高の変化は各等高線で折れ曲がる複数の線分で表されると考えて、各メッシュの地盤高*Zg(x, y)*を推定した。すなわち(*x, y, 0*)が等高線*i, j*に挟まれるとすると、

$$Zg(x, y) = (Zcj(x) - Zci(x))(y - Yci(x)) / (Ycj(x) - Yci(x)) + Zci(x) \tag{23}$$

Zci(x), Zcj(x): 等高線*i, j*でX座標値が*x*のときのZ座標値, *Yci(x), Ycj(x)*: 等高線*i, j*でX座標値が*x*のときのY座標値

次に林内に分布する個体の幹について、胸高部位より下の部分は胸高直径を直径とする鉛直に直立する円柱で、胸高部位より上の部分は胸高部位を底辺とし梢を頂点とする円錐で近似した。さらに、モデル林床の光環境はモデル林

の外側の地形や林の状態に影響を受けるが、こうした外側の情報を細部にわたって得ることは困難である。そのため、ここでは Plot 2 のまわりに地上15m の壁（平均樹高にほぼ相当する）があると仮定した。また樹冠の分布状態を知るために林冠表面形状を推定した。

Plot 2 の中央部の9カ所の地上1m の位置を光量子束密度を推定する位置として（以下、推定位置と呼ぶ）、推定位置ごとに葉、幹、地面などの遮光物の分布状態を次の方法で計算した。

① 推定位置を中心として水平方向Aを1度ごとに0度から360度まで、高低角 V を0度から90度まで1度ごとにプロットの外へ達する半直線を想定した。水平方向 A で高低角 V の半直線を半直線 AV と呼ぶ。

② 推定位置からみて、水平方向Aにある全てのメッシュについて、地表面の高低角を計算し、その中から最大値 Vmax (A) を求めた。V が Vmax (A) 以下のとき、半直線 AV は地面に遮られると判定した。

③ プロット内の全個体について、個体の梢端と根元の高低角を計算した。梢端の高低角と根元の高低角の間にある V について、1度ごとに幹の右端と左端の水平角を求めた。水平角 A がそのときの幹の右端と左端の間にあるとき、半直線 AV は幹に遮られると判定した。

④ 半直線 AV が地面や幹に遮られない場合に、推定位置から外へ向かって半直線 AV を0.1m の単位区間に区切って、それぞれの区間の中央の X, Y, Z 座標値を計算した。このときの座標値が (x, y, z) であるとする。

⑤ (x, y, z) の位置の葉重量密度 fwc(x, y, z) は(3)式(16)式及び(19)式により計算できる。

一般に、植物群落における光の減衰状態は葉面積指数との関係で解析される場合が多い⁽¹⁰⁰⁾ので、任意の位置の葉重量から葉面積に換算する必要がある。そこで、予備試験として着葉分布密度関数を測定した岡山県林業試験場構内のヒノキの葉の一部をサンプルして、葉面積と葉重量の比率を平均して比葉面積を求めたところ、4.0(m²・kg⁻¹)であった。比葉面積は葉の付着位置によって大きな違いがあること⁽⁷⁴⁾が知られているが、本モデルでは計算を単純にするため、比葉面積の空間的変異を無視して、予備試験で得られた値 4.0(m²・kg⁻¹) で一定であると考え、任意の位置の葉面積密度 fac(x, y, z) (m²・m⁻³) を計算した。この操作を (x, y, z) がプロットの外に達するまで繰り返した。

⑥ (x, y, z) がプロットの外に達するときのzが壁のZ座標より小さければ、半直線 AV は壁に遮られるものとした。

⑦ 半直線 AV が通過する総葉面積密度 FII(A, V) (m²・m⁻²) は、単位区間ごとの 0.1・fac(x, y, z) を合計することで求められる。半直線 AV が地面、幹、壁に遮られる場合に、推定位置へ A, V の方向から入射する光は完全に遮断されると考えて、FII(A, V) に負の数を与えることで（幹：-9、壁：-5、地面：-3）、それらに遮られない場合と区分した。

推定位置へ A, V の方向から入射する光の透過率 R(A, V) は、次の式で計算した。

$$\begin{aligned} FII(A, V) < 0 \text{ のとき, } R(A, V) &= 0 \\ FII(A, V) < 0 \text{ のとき, } R(A, V) &= \\ & \exp(-kFII(A, V)) \end{aligned} \quad (24)$$

k: 光の減衰に関するパラメータ

直射光下で吸光係数は葉の傾斜角度と光の入射角度によって変化し、理論式が得られている⁽⁴⁴⁾。ここでは(24)式のパラメータkを(25)式で計算した。なお、(25)式に限って、角度に関する表示をラジアン値で示す。

$$\begin{aligned} \nu \geq \zeta \text{ の場合,} \\ k &= \cos \zeta \\ \nu < \zeta \text{ の場合,} \\ k &= 2 \left\{ \cos \zeta \sin^{-1}(\cot \zeta \tan \nu) + \right. \\ & \left. \sin \zeta \nu (1 - \cot^2 \zeta \tan^2 \nu)^{\frac{1}{2}} \right\} / \pi \end{aligned} \quad (25)$$

ζ: 水平面に対する葉の傾斜角度で、このモデルでは π/4 と仮定した。ν: V のラジアン値。

太陽の位置と林外の光量子束密度の直達光成分と散光成分について矢幡の方法^(96,97)を用いて、計算した。そして、任意の時刻の光量子束密度を(26)式で計算した。

$$\begin{aligned} PPF D &= POBR(As, Vs) + \\ POD \sum_{A=1}^{360} \sum_{V=1}^{90} R(A, V) \sin V / \sum_{A=1}^{360} \sum_{V=1}^{90} \sin V \end{aligned} \quad (26)$$

POB: 林外の光量子束密度の直達光成分, POD: 林外の光量子束密度の散光成分, As: 太陽の位置の水平角, Vs: 太陽の位置の高低角。

以上の方法で、推定位置の任意の時刻の光量子束密度の瞬時値を推定した。すなわち、このモデルにおいて、梢の三次元座標値→林冠の表面形状→林内の着葉分布→林内の光量子束密度の順で推定した。

5.3 モデルによる推定結果と検証

5.3.1 林冠の表面形状の予測

林内のメッシュを占有個体ごとに区切って、個体の林冠の占有状態を例示した（図-33）。この図は、従来から野外で測定されている樹冠投影図と同じ意味を持つ。同一樹冠内に複数の幹が存在する可能性があるが、これは被圧を受けて林冠表面に達しない個体の存在を示している。

無間伐で放置した Plot 1 の中央部と Plot 7 では林冠孔隙が生じず、林冠の投影形状の経時的変化は小さかった。一方、間伐が行われた林では間伐直後に多数の林冠孔隙が生じたが、その孔隙は間伐後の時間経過とともに小さくなり、孔隙の周囲に分布する個体の樹冠は拡大した。すなわち、間伐が行われた林では林冠の投影形状の変化は著しく、個々の樹冠は林冠孔隙の分布状態に依存して変化する。

図-34に林冠の立体構造の動態を例示した。この図は実際の人工林の景観写真に似ており、間伐後の森林の変化を視覚的に理解でき、樹高成長に伴って樹冠が発達する様子がわかる。このように林冠の3次元構造の時間的変化を知ることが、森林に対する作業の影響を視覚的にとらえる点で

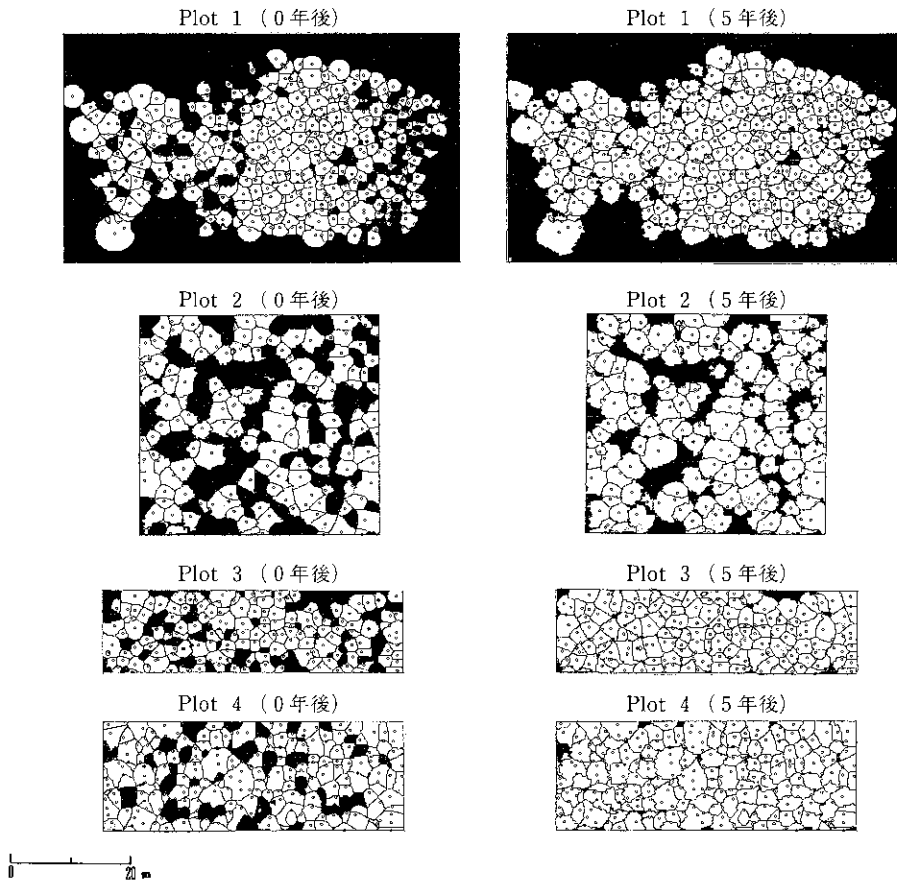


図-33-A 間伐後の個体ごとの占有空間の時間的变化
 白丸は個体の根元の位置を示し、黒い部分は林冠の孔を示す。

有用であると考える。森林作業者は作業の評価を作業後の森林景観で判断する 경우가多く、作業効果の予測を本図のような疑似景観的な林冠立体構造図で示すことは、数値による予測より説得力を持つ場合があろう。たとえば, Plot 2 及び Plot 5 では塊状の間伐や上層間伐で大きな孔をあけたため間伐5年後の樹木の配置状態や樹冠が不均一で、一方 Plot 6 では間伐直後の林冠の孔が均一に配置されており5年後の樹冠の大きさが均一である様子が視覚的に見て取れる。また, Plot 4の間伐前や Plot 1の中央部と Plot 7と5年後は樹冠が過密に配置されている印象を受ける。

間伐後の林冠孔隙の変化を見るために図-6のプロット縁から2mを除いた部分について林冠孔隙の面積割合(以下、林冠孔隙率と呼ぶ。図-33の黒塗りの部分の面積が対象部分の面積に対する割合)を計算した。ただし, Plot 1については間伐区と無間伐区が混在することとプロットが不規則な形状であることなどの理由から、プロット縁から2mを除いた部分の計算は煩雑である。そこで, Plot 1については図-6に示す林冠孔隙率変化測定用のサブプロットを設けて林冠孔隙率を計算した。間伐直後に林冠孔隙率は増加したが、林冠孔隙率の増加量は材積間伐率に伴って大きくなり、林冠孔隙率の増加量と材積間伐率はほぼ1:1の直線上にならんだ(図-35)。間伐前の森林内に被圧個体がなく、個体の樹冠投影面積と幹材積に1次の関係があると仮定したとき、間伐直後の林冠孔隙率の増加量は材積間伐率と一致する。モデルによる推定結果はこのことと概ね一致した。

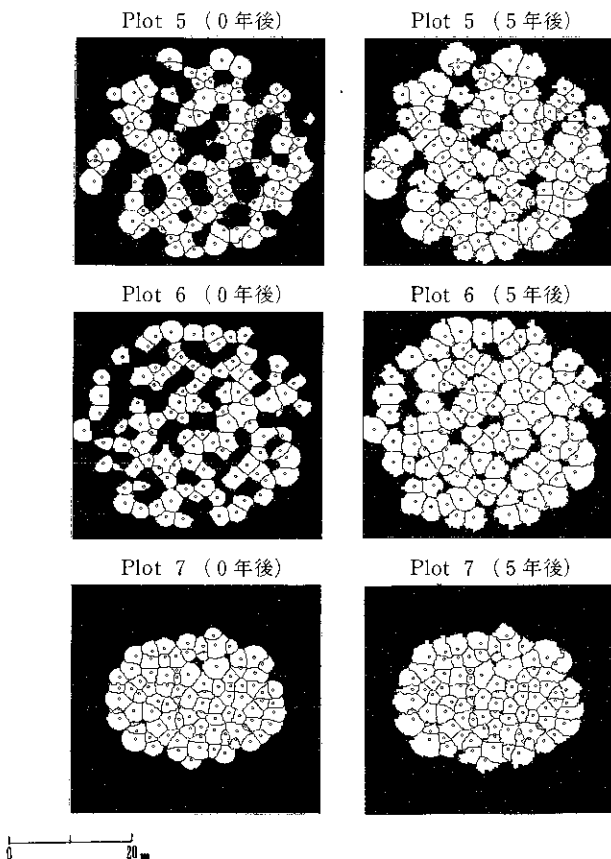


図-33-B 間伐後の個体ごとの占有空間の時間的变化

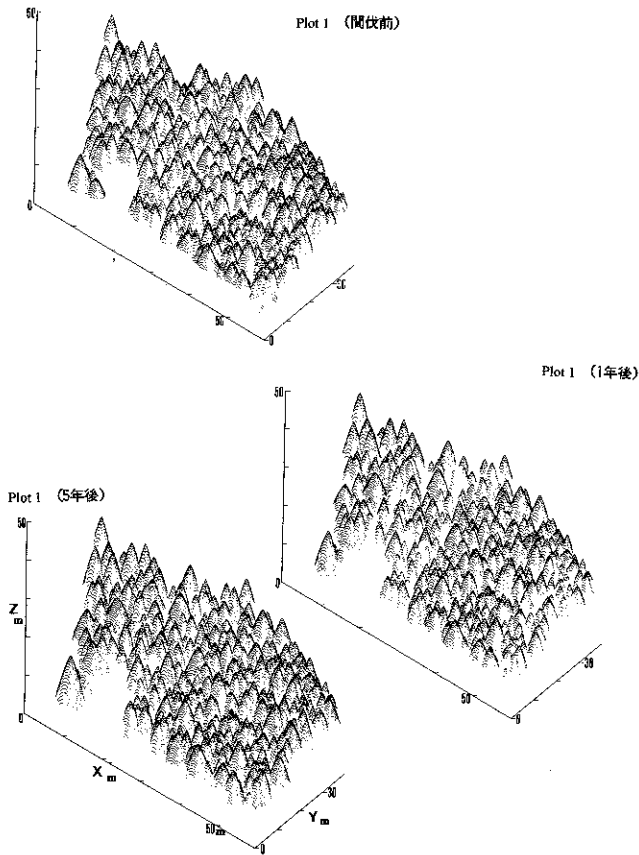


図-34-A 間伐後の林冠の立体構造の時間的変化
山状のひとまとまりの図形が個体の樹冠を示し、白い部分は林冠の孔を示す。
森林に對面する小高い場所から見下ろした景觀に似ている。

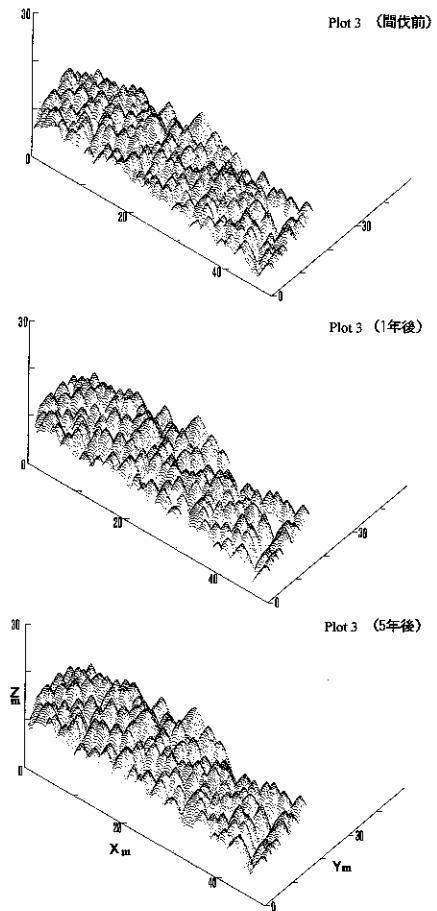


図-34-C 間伐後の林冠の立体構造の時間的変化

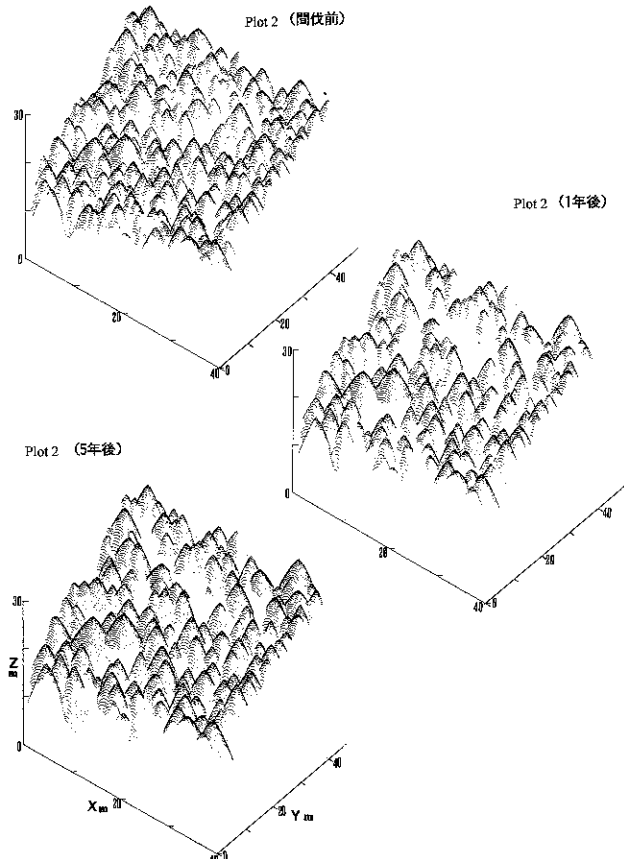


図-34-B 間伐後の林冠の立体構造の時間的変化

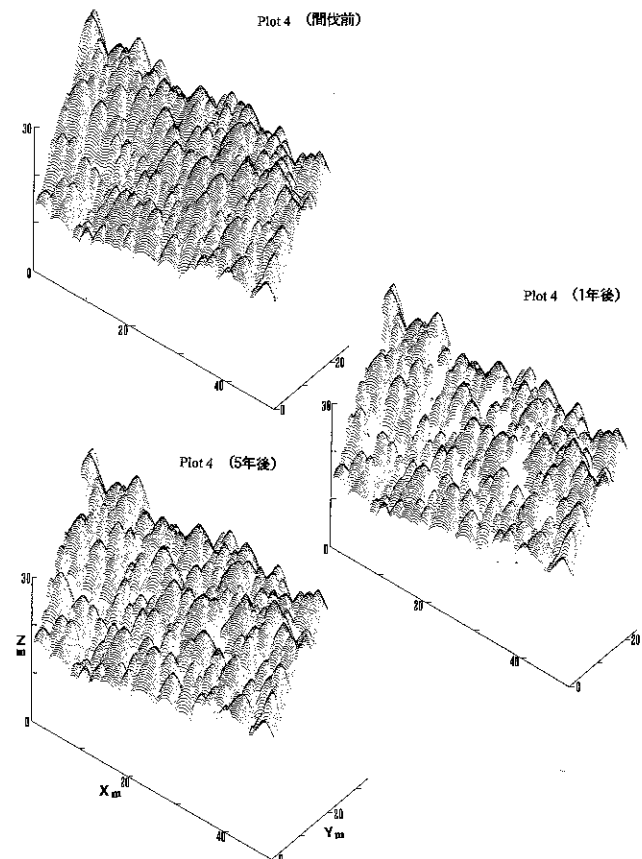


図-34-D 間伐後の林冠の立体構造の時間的変化

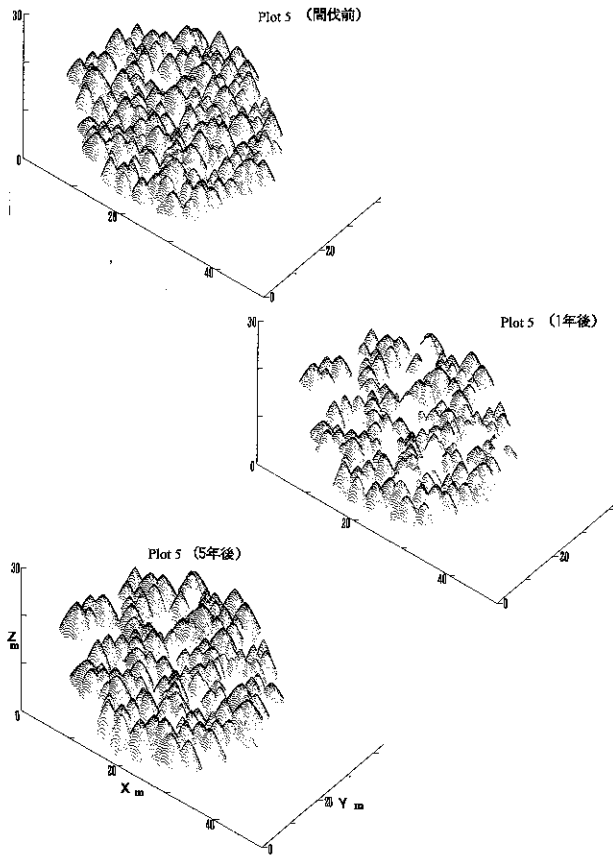


図-34-E 間伐後の林冠の立体構造の時間的変化

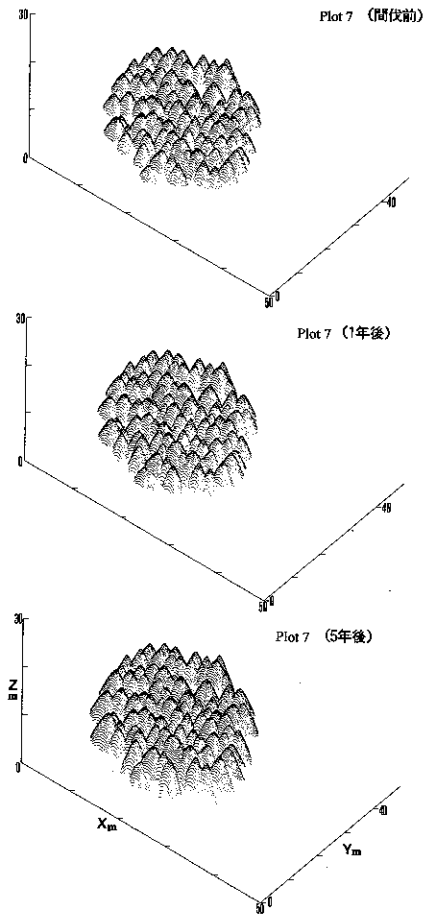


図-34-G 間伐後の林冠の立体構造の時間的変化

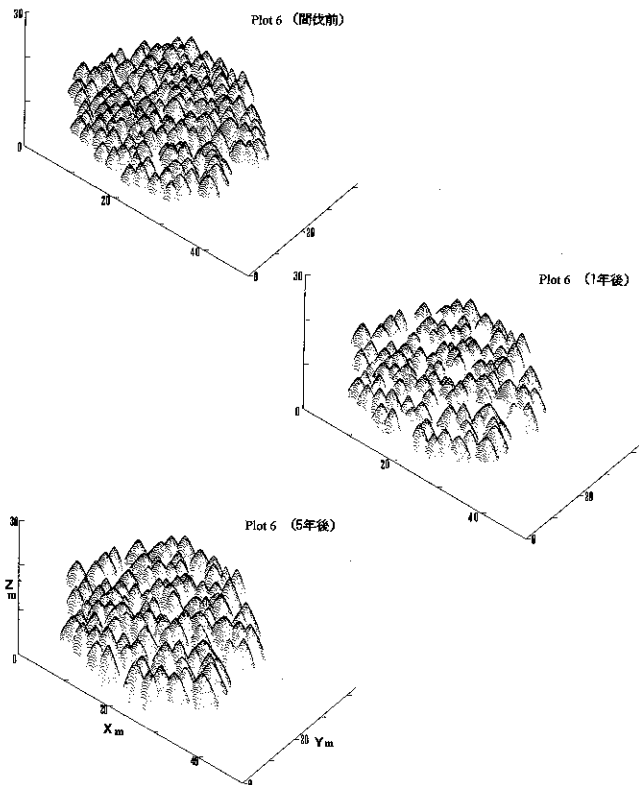


図-34-F 間伐後の林冠の立体構造の時間的変化

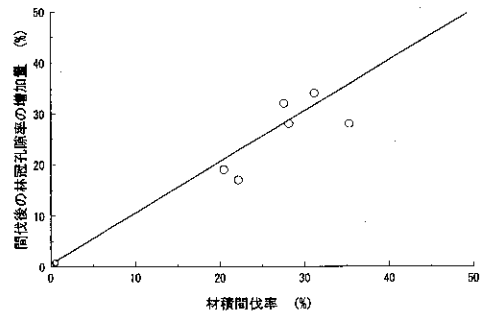


図-35 材積間伐率と林冠孔隙率の増加量の関係

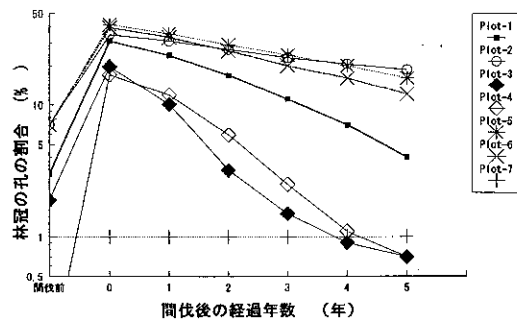


図-36 林冠孔隙率の間伐後の時間的変化
林冠孔隙率の軸目盛りは対数値である。

林冠孔隙率は間伐後の時間経過に伴って指数関数的に減少した(図-36)。林冠孔隙率の時間的変化を測定することは困難であるので、このモデルによる推定結果と実測例と比較することはできない。そこで、各地の現実林分で測定されている間伐後の相対照度の変化^(6,18,33,35,99)と比較した。林内の相対照度は林冠孔隙率と等しいとすることはできないが、両者の関係が密接であることは認められるであろう。間伐後の相対照度も指数関数的に減少することが知られており、モデルにより推定された林冠孔隙率の変化の傾向と同じであった。

間伐後の林冠孔隙率と相対照度の減少程度を比較するため、(27)式で間伐後の林冠孔隙率及び相対照度の減少速度を求めた。

$$Rt/R0 = \exp(-\lambda t) \quad (27)$$

$R0$: 間伐直後の林冠孔隙率あるいは相対照度, Rt : 間伐 t 年後の林冠孔隙率あるいは相対照度, λ : 間伐後の林冠孔隙率あるいは相対照度の減少速度

図-23の模式図で明らかなように、間伐後の樹冠の半径方向の成長は樹高成長量と密接な関係があると考えられるので、林冠孔隙率および相対照度の減少速度 λ について樹高成長量との関係を求めた。林冠孔隙率も相対照度も間伐後の減少速度は樹高成長量が大いほど大きく、モデルにより

推定された林冠孔隙率の減少速度 λ は現実林分で測定された相対照度の減少速度とほぼ等しかった(図-37)。すなわちモデルにより推定した林冠孔隙率の変化は報告されている相対照度の変化と類似したものであり、本モデルの有効性を示唆するものであった。

5.3.2 着葉分布状態の予測と検証

間伐時に梢から1mの層別別に葉重量を測定した個体のうち、プロットの縁にかからないスギ(Plot 1) 7個体、ヒノキ(Plot 2~6) 25個体について、 $F(zt)$ の推定値と

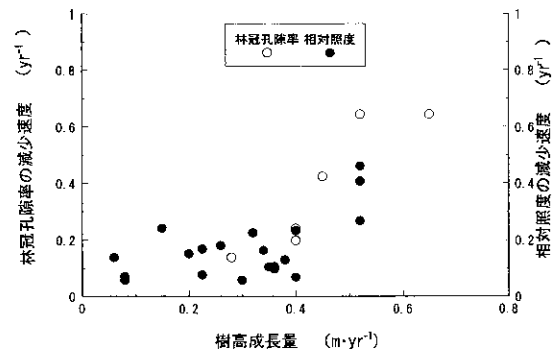


図-37 間伐後の林冠孔隙率と相対照度の減少速度と樹高成長量の関係

林冠孔隙率と相対照度の減少速度は(26)式で計算した。相対照度の変化は過去の文献(6, 18, 35, 98)による

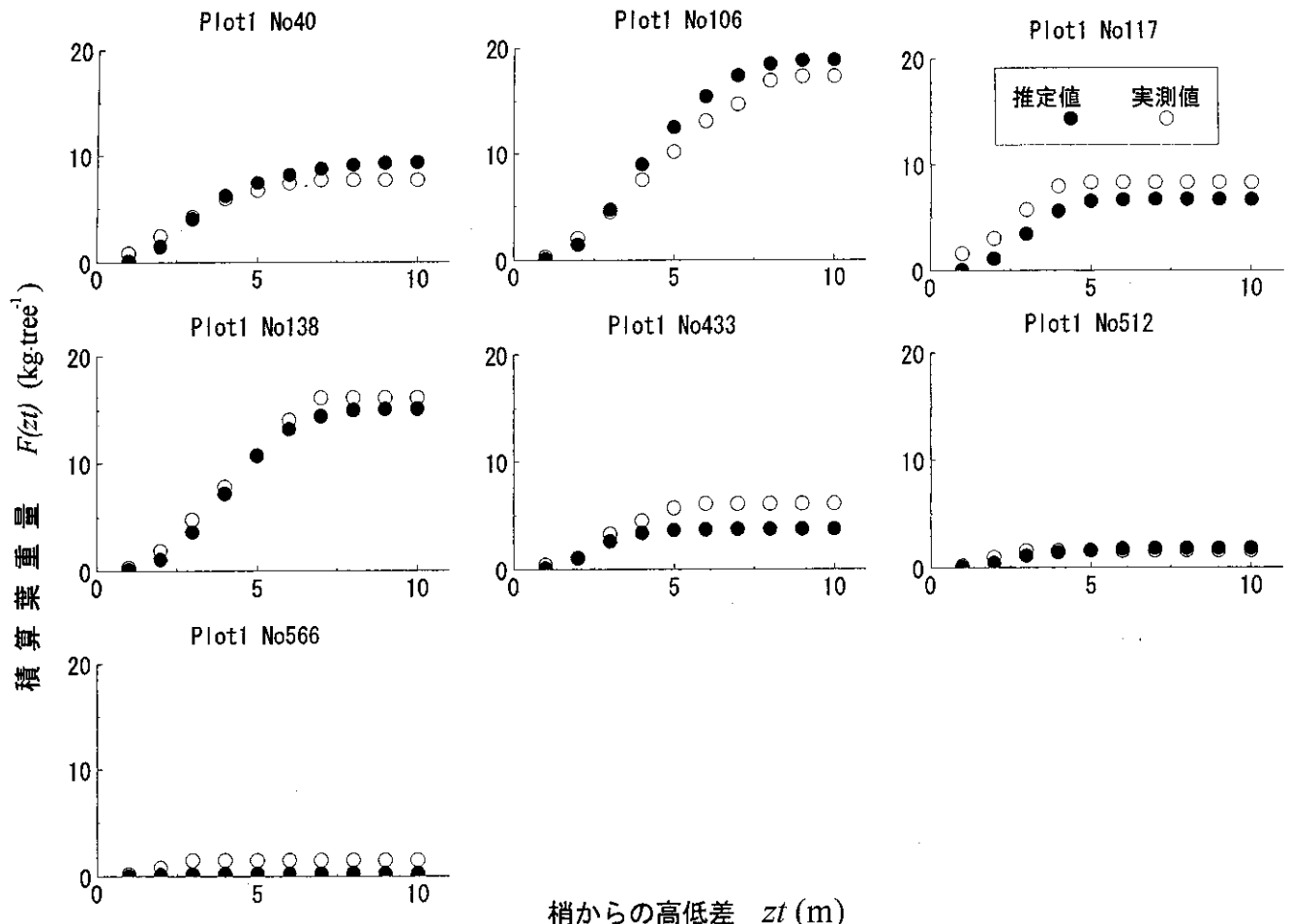


図-38 $F(zt)$ の推定値と実測値の垂直変化(スギ)

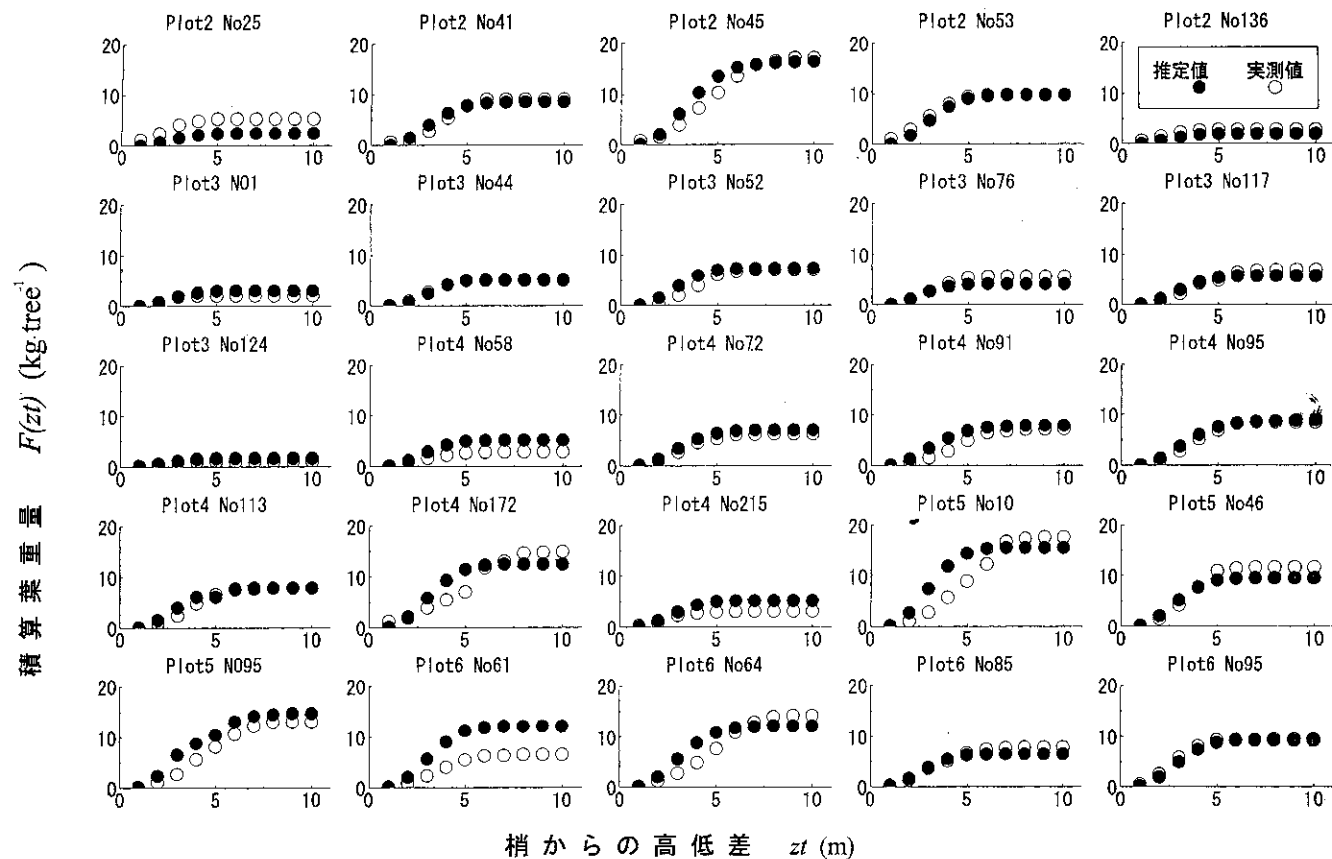


図-39 $F(zt)$ の推定値と実測値の垂直変化 (ヒノキ)

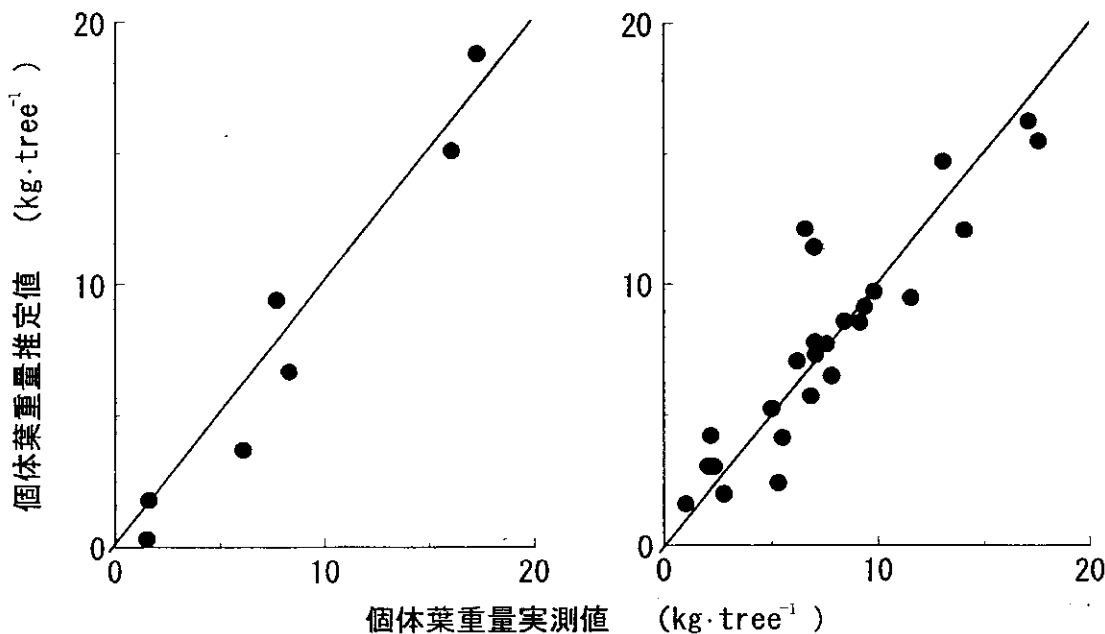


図-40 個体葉重量の実測値と推定値の比較

左側は Plot 1 (スギ) の例で推定値と実測値の相関係数は0.98であった。右側は Plot 2~6 (ヒノキ) の例で推定値と実測値の相関係数は0.91であった。図中の線は推定値=実測値の関係を示す。

実測値を比較した(図-38,39)。 $F(zt)$ の推定値の zt に対する変化はスギ、ヒノキともにほとんどの個体で実測値の変化と良く類似していた。

樹種別に個体の全葉重量について推定値と実測値の回帰直線を求めたところ、両者の単回帰直線が1:1の直線と

等しいとする帰無仮説は棄却されず ($P > 0.05$), 相関係数は0.98(スギ), 0.91(ヒノキ)であった(図-40)。ヒノキの個体葉重量の推定値と実測値の相関係数はスギより小さかった。この原因として、樹齢の異なる複数の林に対して同一の着葉分布密度関数を適用したことがあげられる。

ここで求めた推定値と実測値の回帰直線の相関係数をどのように評価すべきだろうか。通常個体の葉重量を推定する場合に胸高直径 D と樹高 H で示される D^2H とのべき乗式が用いられる⁽⁷⁴⁾。そこで樹種別に D^2H と葉重量の対数値を回帰して、回帰式から葉重量推定値を求めた。べき乗式による推定値と実測値の単回帰により相関係数を求めるとスギ0.91, ヒノキ0.89であり、本モデルによる葉重量の推定値と実測値の相関係数よりやや小さかった。本モデル

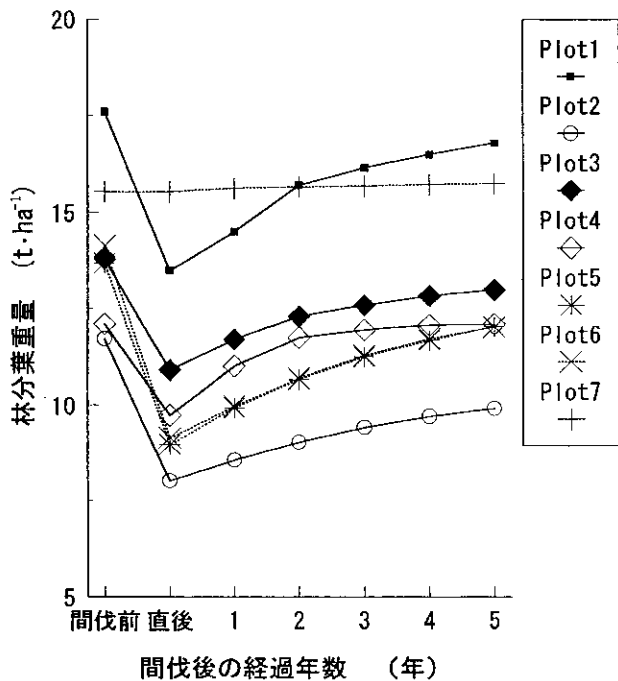


図-41 間伐後の林分葉重量の経時変化

による葉重量の推定精度は D^2H を用いたべき乗式による推定精度と同程度以上で、ほぼ満足できる水準にあると考えた。

間伐前の林分葉重量はスギの場合 $17.5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, ヒノキの場合 $12 \sim 14 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ であった(図-41)。従来報告されている D^2H のべき乗式で推定された林分葉重量はスギの場合 $15 \sim 25 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1(12,71,75,77,85,89)}$, ヒノキの場合 $10 \sim 16 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1(12,56,76,85,86)}$ で、モデルによる推定結果と一致した。間伐直後に林分葉重量が小さくなったが、その後、時間とともに増加し、間伐前の林分葉重量に漸近した。この間伐後の林分葉重量の回復過程は従来の報告と一致した^(74,89)。樹高成長量の大きい Plot 1, 3, 4 において林分葉重量の回復速度は大きく、Plot 4 では間伐後5年目で間伐前の林分葉重量のレベルに回復した。このような間伐後の林分葉重量の変化を実測値と比較することはできないが、回復過程が従来の報告と一致したことはモデルの有効性を示唆するものである。

5.3.3. 材積成長量の予測と検証

間伐時に樹幹解析を行った個体のうちプロットの縁にからないスギ (Plot 1) 19個体とヒノキ (Plot 2 ~ 6) 25個体について、間伐前3年間の材積成長量から年平均材積成長量を求めた。同じ個体について、シミュレーションにより間伐時の単年材積成長量を推定平均して実測値と比較した。実測値と推定値を単回帰したところ相関係数は0.92(スギ), 0.93(ヒノキ)で(図-42), 両者の単回帰直線が1:1の直線と等しいとする帰無仮説は棄却できなかった ($P > 0.05$)。このことから間伐時点での個体材積成長量の推定精度は高いと言える。

つぎに、間伐後の材積生長量について検証した。間伐後の林内全個体について樹幹解析を行うことができなかった

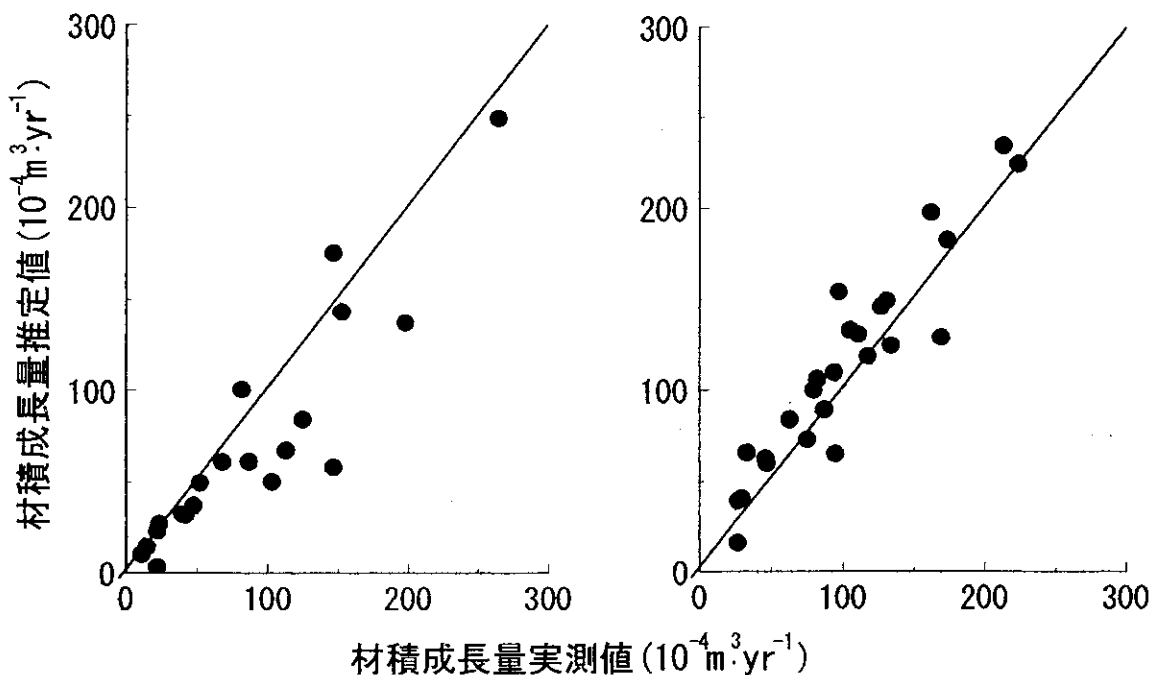


図-42 個体材積成長量の実測値と推定値の比較

左側は Plot 1 (スギ) の例で推定値と実測値の相関係数は0.92であった。右側は Plot 2 ~ 6 (ヒノキ) の例で推定値と実測値の相関係数は0.93であった。図中の線は推定値=実測値の関係を示す。

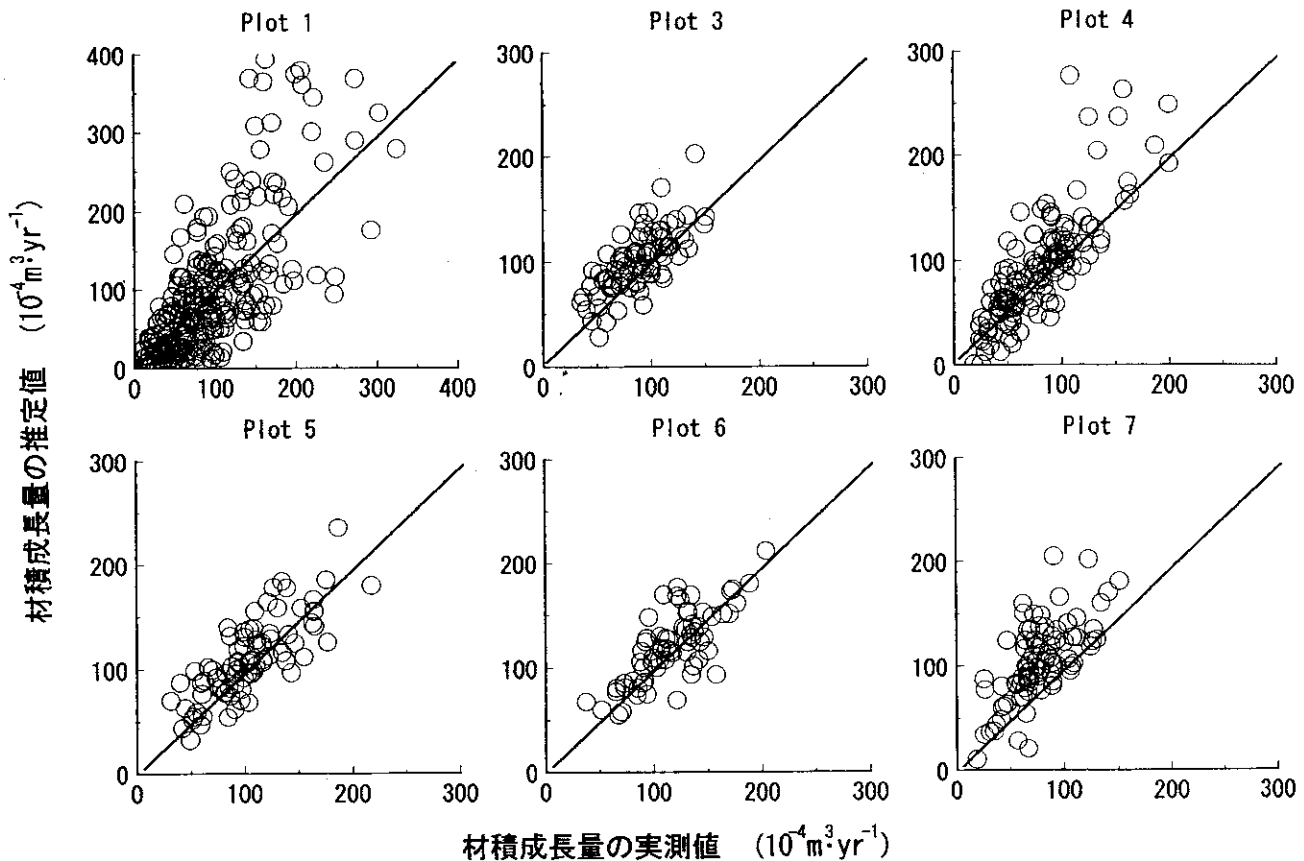


図-43 間伐後の個体材積成長量の検証基準値 (D^2H によって推定した値) と推定値の比較
 Plot 1, 3, 4, 5, 6, 7の検証基準値と推定値の相関係数は0.73, 0.72, 0.81, 0.78, 0.76, 0.67であった。図中の線は推定値=実測値の関係を示す。

ので、間伐時に樹幹解析を行った個体の材積 (V) を D^2H のべき乗式で回帰して、この関係を間伐時と間伐数年後 (Plot 1, 4は3年後, Plot 3は4年後, Plot 5, 6, 7は5年後) の毎木調査データに適用して、それぞれの時期の個体材積を推定し個体材積生長量を求めて、検証の基準値とした。プロットの縁にかかる個体や、測定ミスやなんらかの障害などで材積成長量がマイナスと計算された個体を除いて推定値と比較した。全てのプロットで、推定値と検証の基準値の関係を示す点はバラツキがあるものの1:1の直線を中心として分布した (図-43)。相関は0.7前後とあまり高くなかった。この理由の一つとして胸高直径や樹高の測定誤差や材積を求めるべき乗式の関係を一定とした点など検証の基準値側の問題があげられる。

一般に植物の成長量は期首のサイズと関係が深いと考えられる⁽⁶⁹⁾。個体材積成長量と初期の個体材積の関係を求めると、Plot 1, 3, 4, 5, 6及び7のプロットごとの相関はそれぞれ0.71, 0.73, 0.72, 0.66, 0.77, 0.78で、モデルによる推定の場合の相関とほぼ同程度であった。しかし、Plot 3~7をまとめて相関を計算したところ、樹齢や間伐の有無及び密度環境が林分ごとに異なるため初期材積と材積成長量の相関は低くなった。一方、モデルによる推定値との相関は異なるプロットをまとめても相関が低くなることはなかった (図-44)。すなわち、本モデルによる間伐後の材積成長量の推定値と検証基準値との関係はプロットが異なっても安定的であった。また、モデルによる材積

成長量の設定誤差が $0.005\text{m}^3\cdot\text{yr}^{-1}$ 以上となる個体は全体の10%未満であった。これらの理由から検証基準値側の問題を考えれば、満足できるレベルにあると考えた。

5.3.4 林床の光量子束密度の予測と検証

1994年4月17日から19日までの3日間と7月16日に、Plot 2の推定位置で (図-6) 光量子束密度を2分おきに光量子センサー (小糸工業 (株) 製 IKS25) とデータロガーの組み合わせで測定した⁽⁵¹⁾。また、同じ位置で魚眼レンズを用いて全天空写真を撮影した。さらに林から600m離れた広場でPPFDを2分おきに測定し、林外の光量子束密度とした。測定日の天候は4月17日から19日まで晴れ、曇り、晴れと変化し、7月16日は晴れであった。この測定結果をモデルによる推定結果の検証に用いた。

A, V のすべてについて、 $FII(A, V)$ を表示し、魚眼レンズによる全天空写真をまねてにせ全天空写真を描いた (図-45)。いわば計算機によってシミュレーションで全天空写真を模したものでもいえよう。にせ全天空写真の林冠孔隙の分布状態は魚眼レンズによる全天空写真によく似ていた。

林内の明るさの指標として、曇天時の相対照度を用いる場合がある⁽¹⁸⁾。4月18日の10時から14時までの光量子束密度を平均し林外の光量子束密度との相対値を求めて、実測値と推定値を比較した (図-46)。相対光量子束密度の実測値は15%から30%の範囲にあり、推定位置ごとの違いは小さかった。実測値と推定値は相関があり (相関係数0.7),

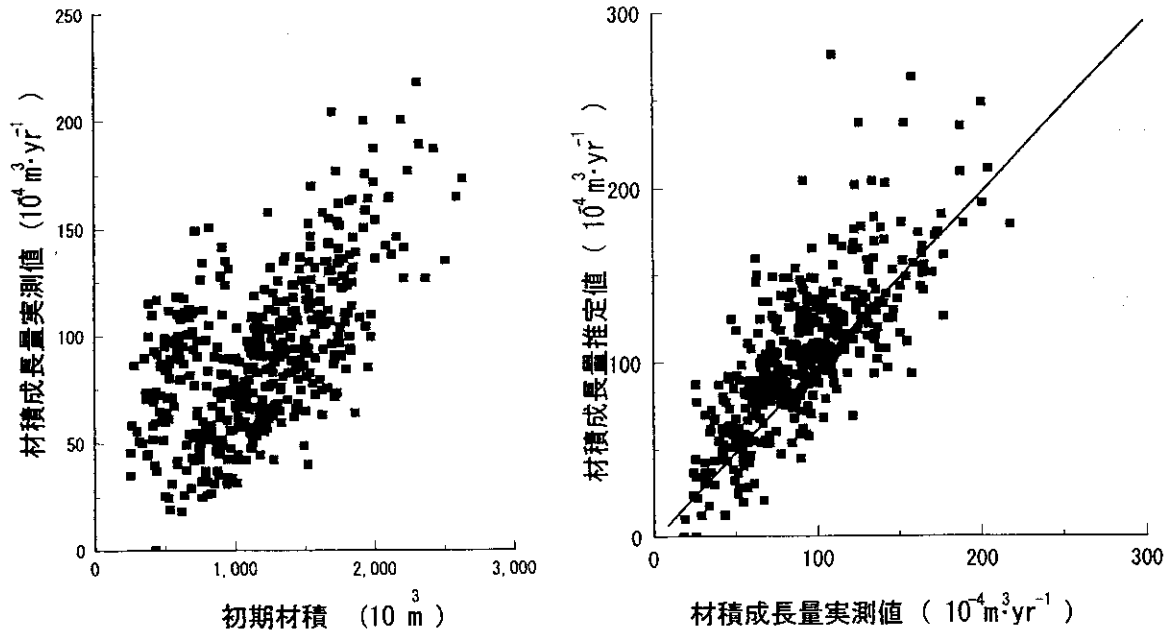
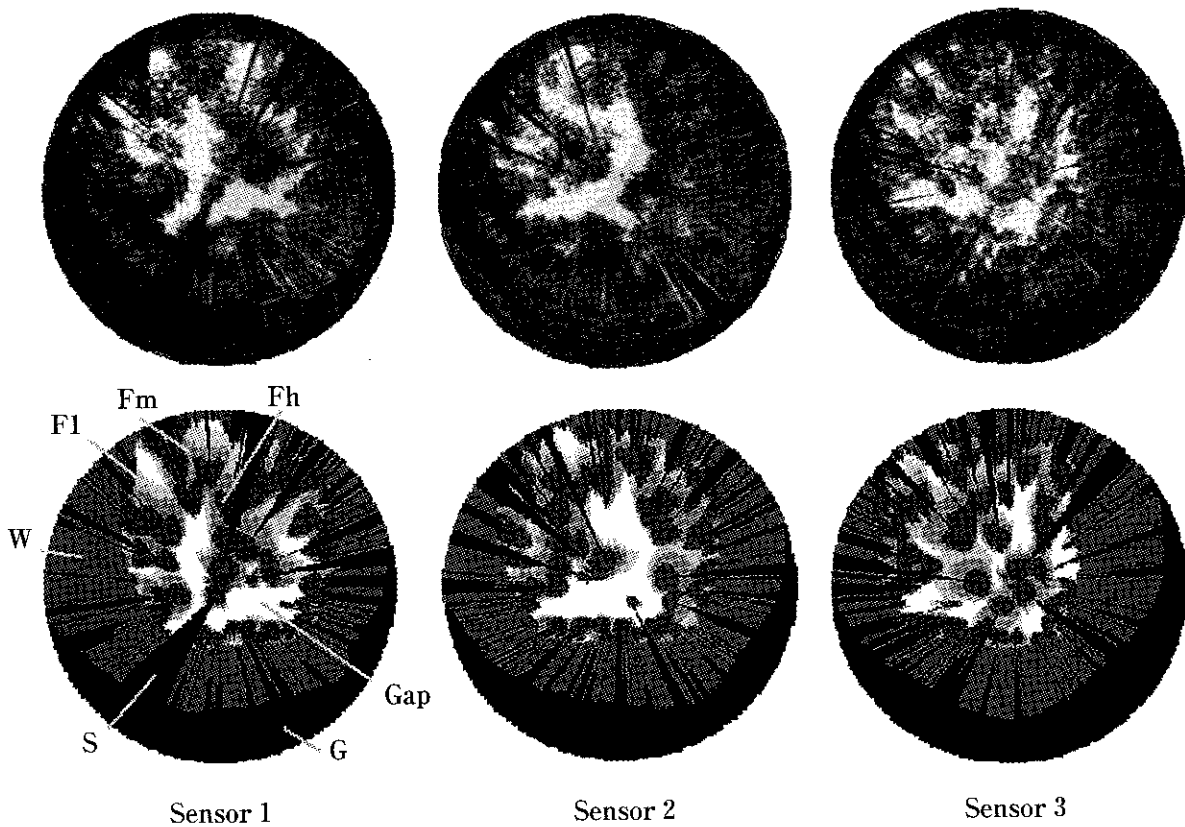


図-44 初期材積と材積成長量の検証基準値との関係および材積成長量の検証基準値と推定値の比較

Plot 3~7をこみにして示した。初期材積と材積成長量の相関係数は0.61で、推定値と基準値の相関係数は0.70であった。右側の図中の線は推定値=実測値の関係を示す。

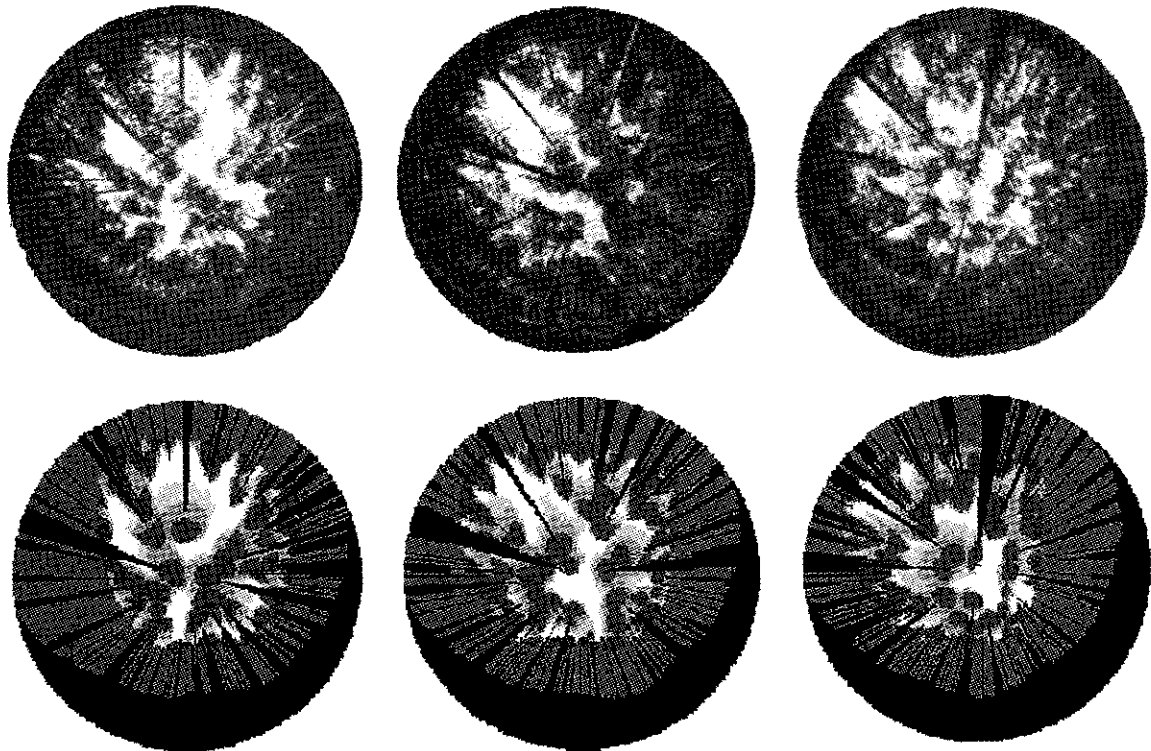


Sensor 1

Sensor 2

Sensor 3

図-45-A 魚眼レンズによる全天空写真(上段)とモデルによるにせ全天空写真(下段)にせ全天空写真の凡例 G:地面, S:幹, W:壁, Gap:林冠の孔, Fh:葉密度高 $FH(A, V) \geq 3$, Fm:葉密度中 $1 \leq FH(A, V) < 3$, Fl:葉密度低 $FH(A, V) < 1$

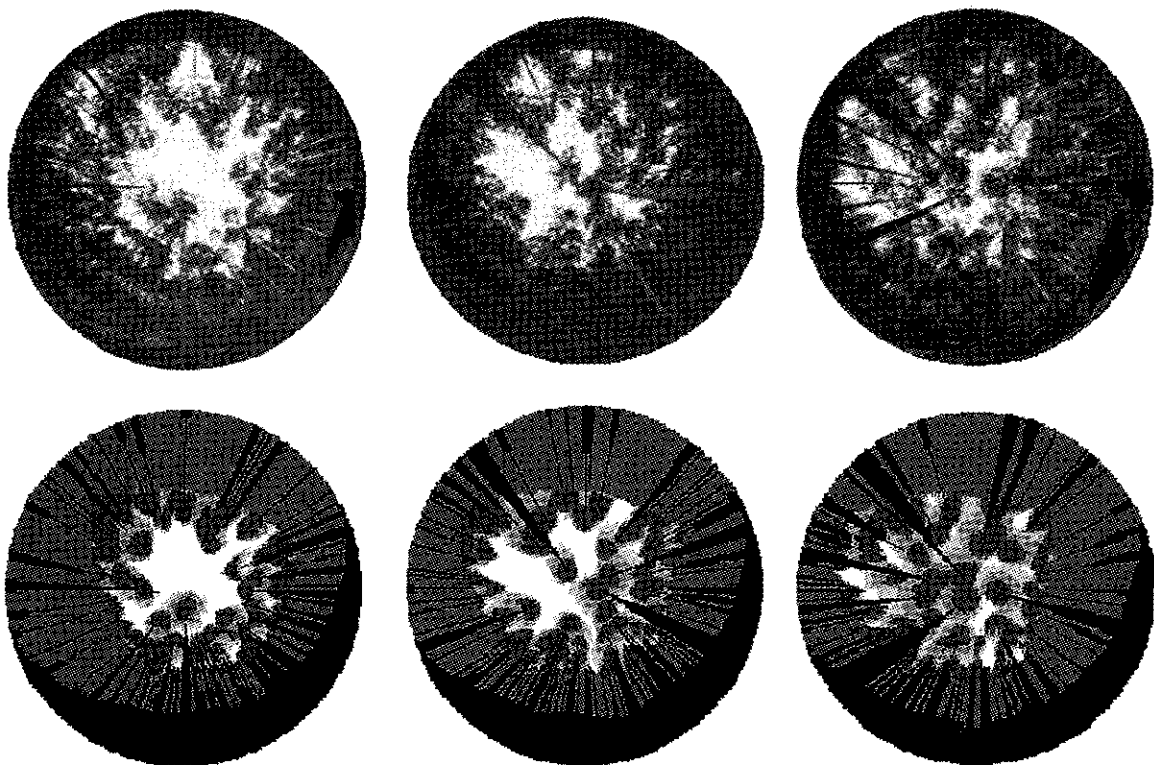


Sensor 4

Sensor 5

Sensor 6

図-45-B 魚眼レンズによる全天空写真（上段）とモデルによるにせ全天空写真（下段）



Sensor 7

Sensor 8

Sensor 9

図-45-C 魚眼レンズによる全天空写真（上段）とモデルによるにせ全天空写真（下段）

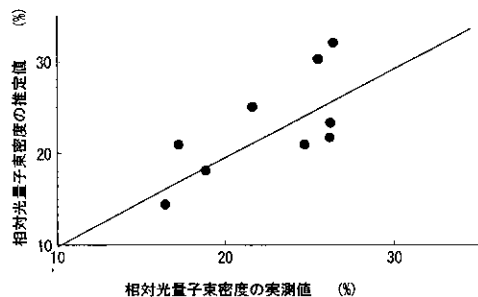


図-46 曇天日の相対量子束密度の実測値と推定値の比較
1994年4月18日(くもり)の10時から14時までの林内と林外の量子束密度の平均値の比を相対量子束密度とした。実測値と推定値の相関係数は0.70であった。

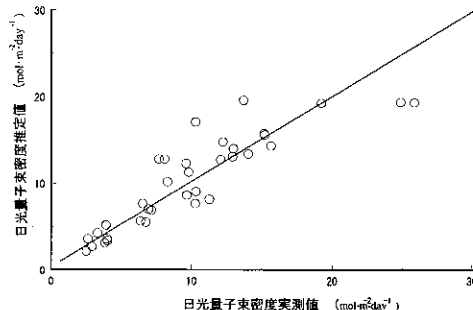


図-48 日量子束密度(6:00~18:00の積算値)の実測値と推定値の比較
実測値と推定値の相関係数は0.89であった。

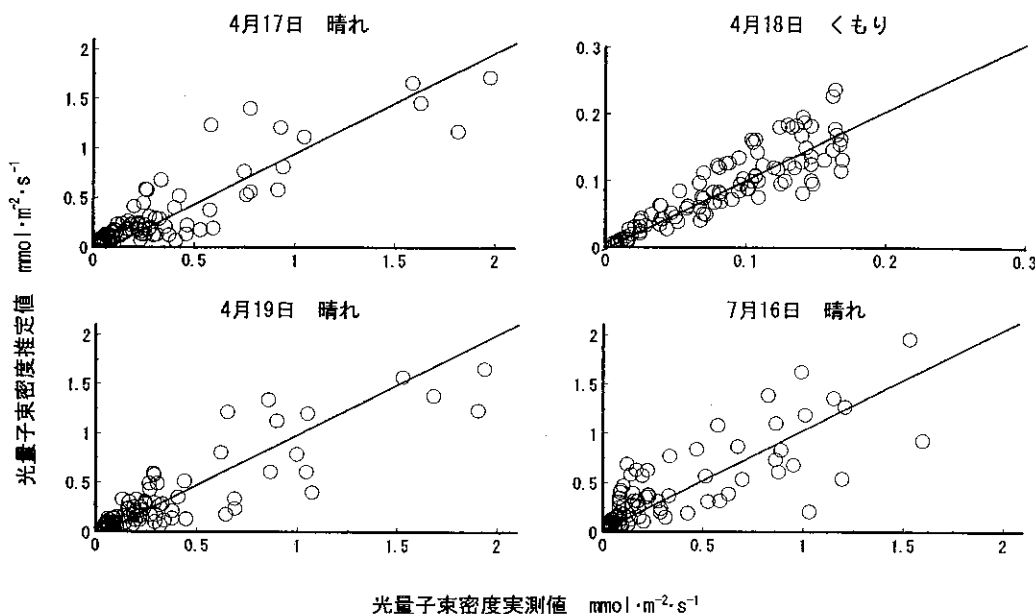


図-47 量子束密度(1時間平均値)の実測値と推定値の比較
実測値と推定値の相関係数は4月17日, 18日, 19日および7月16日で, それぞれ0.90, 0.91, 0.88, 0.83であった。

散布点は1:1の直線を中心として分布した。

つぎに林内の6時から17時までの量子束密度を1時間ごとに平均して推定値と実測値を比較した(図-47)。9個の測定点をこみにしたとき4日間ともに相関は高く, 両者の回帰直線が1:1の直線に等しいとする帰無仮説は棄却できなかった($P > 0.05$)。曇りの日の相関は最も高かった。一方7月16日の相関は最も低く, 推定値は実測値より大きかった。葉量の季節変化をモデル内で考慮しなかったため, 7月の推定に誤差を生じたのかもしれない。6時から17時までの量子束密度の積算値を測定日ごとセンサーごとに求めて推定値と実測値を比較したところ(図-48), 相関は高く両者の回帰直線が1:1の直線に等しいとする棄無仮説は棄却できなかった($P > 0.05$)。

可知⁽²²⁾は, 光の頻度分布に対応した最適な光合成能力があることを理論的に考察し, 林床の植物の光合成特性とその植物が生育する空間の量子束密度の頻度分布に関係があることを報告した。このように下木の光合成能力や成長を考える上で量子束密度の頻度分布を知ることは重要であると考え, 6時から17時までの量子束密度の頻度分布について実測値と推定値を比較した(図-49)。

いずれの推定位置, 推定日においても量子束密度の測定値はほとんどが $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下か, $1 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上で, $0.4 \sim 1 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲の出現頻度は小さかった。推定値でも同様の傾向はみられ, $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の頻度分布はよく類似していた。しかし, $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下の弱い光では推定誤差がみられる場合があった。弱い光の部分で推定誤差がみられた理由として, 枝による光減衰を無視したこと, プロットの外の状態を壁としてプロット外からの光は完全に遮断されると考えた点, モデルでは天空の輝度を均等として取り扱った点⁽⁹⁷⁾などが考えられる。推定位置に一枚の葉があるとして, その一枚の葉の光合成速度について考えると, 葉の光合成速度は量子束密度が $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下の時に急激に変化するので^(15,91), この範囲の量子束密度の出現頻度に誤差が生じる場合があったことは問題であり, 散光成分の光減衰割合の求め方について今後検討する必要がある。

梢の三次元座標値から推定された林冠表面形状を用いて, 林床の量子束密度を予測することを試みた。 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下の弱い光域の量子束密度の出現頻度について精度上問題があったが, 1時間ごとの平均値, 1日の積算

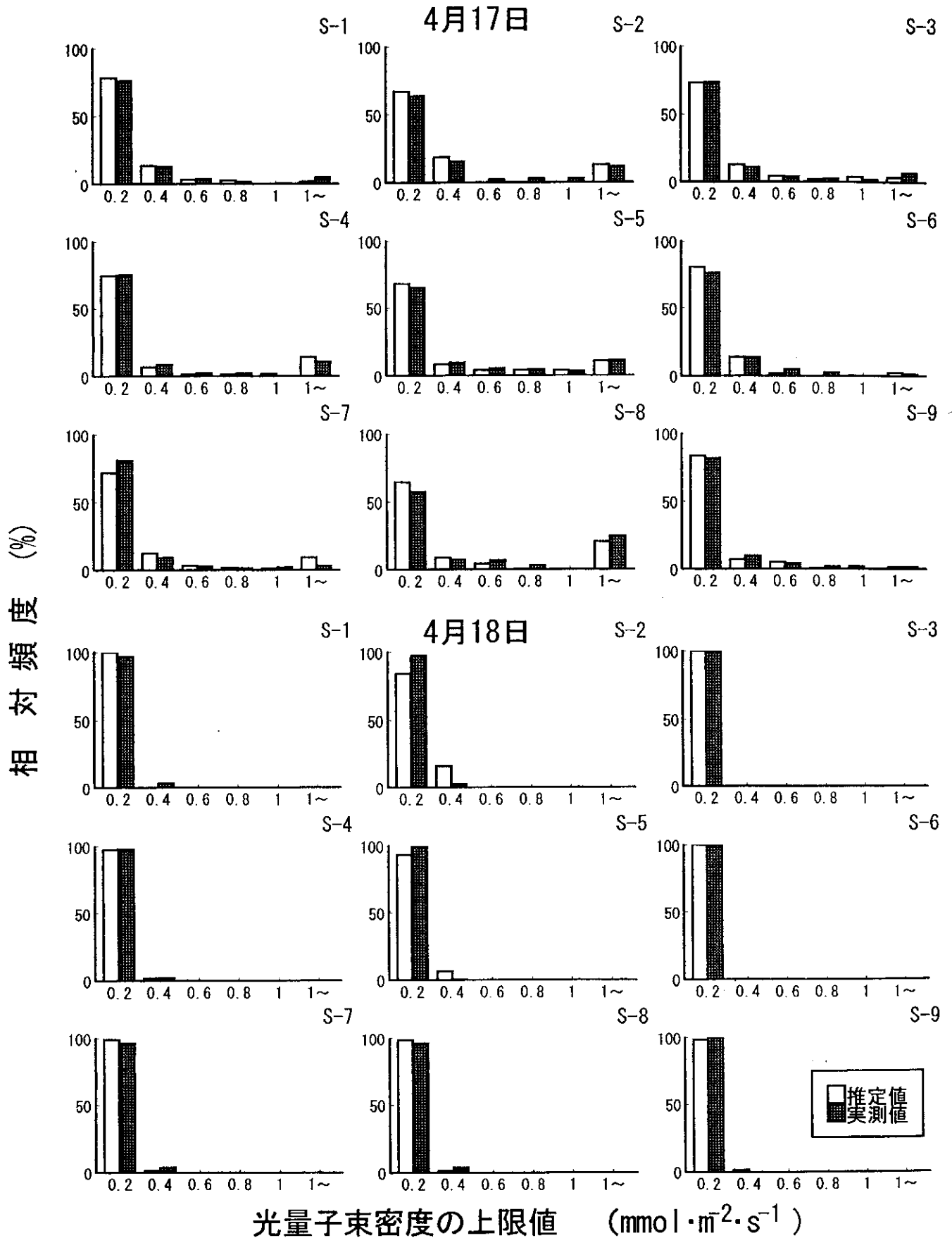


図-49-A 光量子束密度の頻度分布の実測値と推定値の比較
 4月17日と4月18日の6:00~18:00の頻度分布。S-番号は光量子束密度の測定位置を示す。

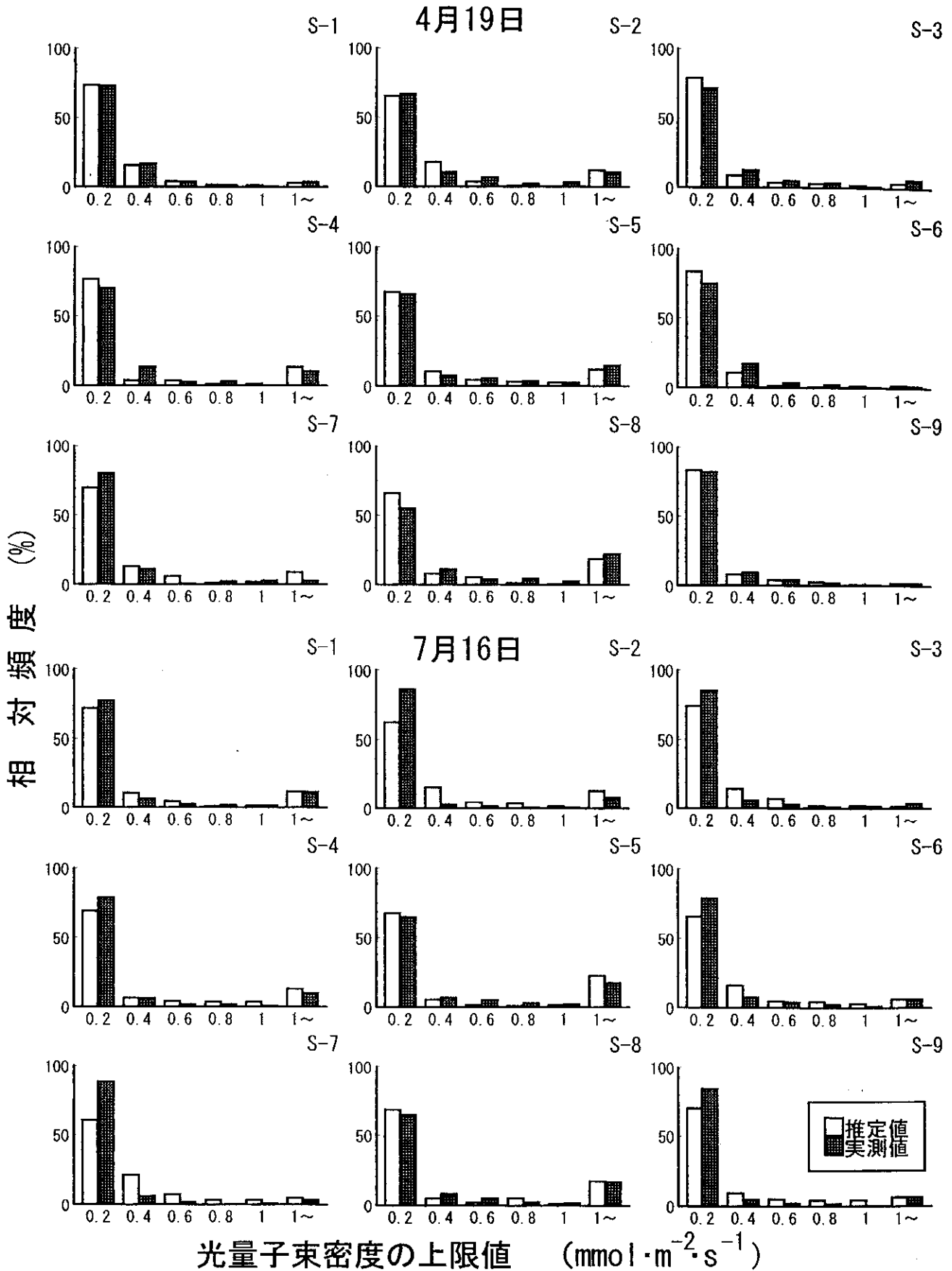


図-49-B 光量子束密度の頻度分布の実測値と推定値の比較

4月19日と7月16日の6:00~18:00の頻度分布。S-番号は光量子束密度の測定位置を示す。

値や $0.4\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の範囲の出現頻度については満足できる推定値が得られた。今後の工夫によって間伐後の光環境の子測などの局面に利用できると思われる。

第6章 林冠動態モデルによる間伐特性評価

6.1 モデルによる間伐実験の目的

育林作業の現場では多様な間伐方法が実行されている。そこで間伐方法の違いが間伐後の葉重量や個体成長及び林床の光環境にどのような影響を及ぼすかを把握し、間伐方法ごとの評価をすることは重要である。しかし、実際の森林において間伐方法の評価を行おうとすると、労力、間伐に伴うコスト、及び結果がわかるまでの時間が必要である。また、同じ場所で同時に異なる間伐方法を実行することはできず、厳密な意味での比較ができない。さらにやりなおしができないので、その森林に大きなダメージを与えるかもしれないような特殊な間伐を実行しにくい面がある。このようなコストや時間を節約し、リスクを回避しながら間伐方法の評価ができることが、本モデルのメリットである。

本章では、前章までに有効性の確かめられた林冠動態モデルを適用して間伐方法の評価を行った。すなわちコンピュータ上で間伐木を選木し、任意の樹高成長量を設定して、モデルによって間伐後の残存木の着葉構造と個体材積及び林床の光環境の変化を予測した。コンピュータの中で間伐

し、その後の森林の変化を観察するので、「モデルによる間伐実験」と呼ぶことにする⁽⁵²⁾。また、ここで行ったモデルによる間伐実験は樹高成長量、個体ごとの間伐の有無等の変数の変化に対するモデルの動作状況を調べるものともいえる。

6.2 間伐方法が着葉構造および材積成長量に及ぼす影響の評価

6.2.1 方法

モデルによる間伐実験の対象林として、Plot 1の中央部の $24\text{m}\times 24\text{m}$ の区画の範囲にある毎木調査データ（個体の

表-6 間伐ゲームによる間伐方法

間伐案名	間伐種	間伐強度	間伐前		間伐後		間伐率	
			本数	林分材積	本数	林分材積	本数率	材積率
P-1	下層	10%区	2800	161.54	2,100	144.4	25.00	10.61
P-2	"	20%区	"	"	1,775	127.3	36.61	21.19
P-3	"	40%区	"	"	1,175	97.6	58.04	39.58
P-4	"	60%区	"	"	675	62.8	75.89	61.11
P-5	上層	10%区	"	"	2,375	134.3	15.18	16.89
P-6	"	20%区	"	"	2,400	125.9	14.29	22.09
P-7	"	40%区	"	"	1,850	82.1	33.93	49.21
P-8	"	60%区	"	"	1,475	56.9	47.32	64.76
P-9	全層	10%区	"	"	2,425	142.6	13.39	11.73
P-10	"	20%区	"	"	2,075	125.6	25.89	22.22
P-11	"	40%区	"	"	1,525	92.1	45.54	42.96
P-12	"	60%区	"	"	1,000	63.0	64.29	60.99

単位 本・ha⁻¹ m³・ha⁻¹ 本・ha⁻¹ m³・ha⁻¹ % %

P-1, 2...12は、間伐案1, 2...12を示す。

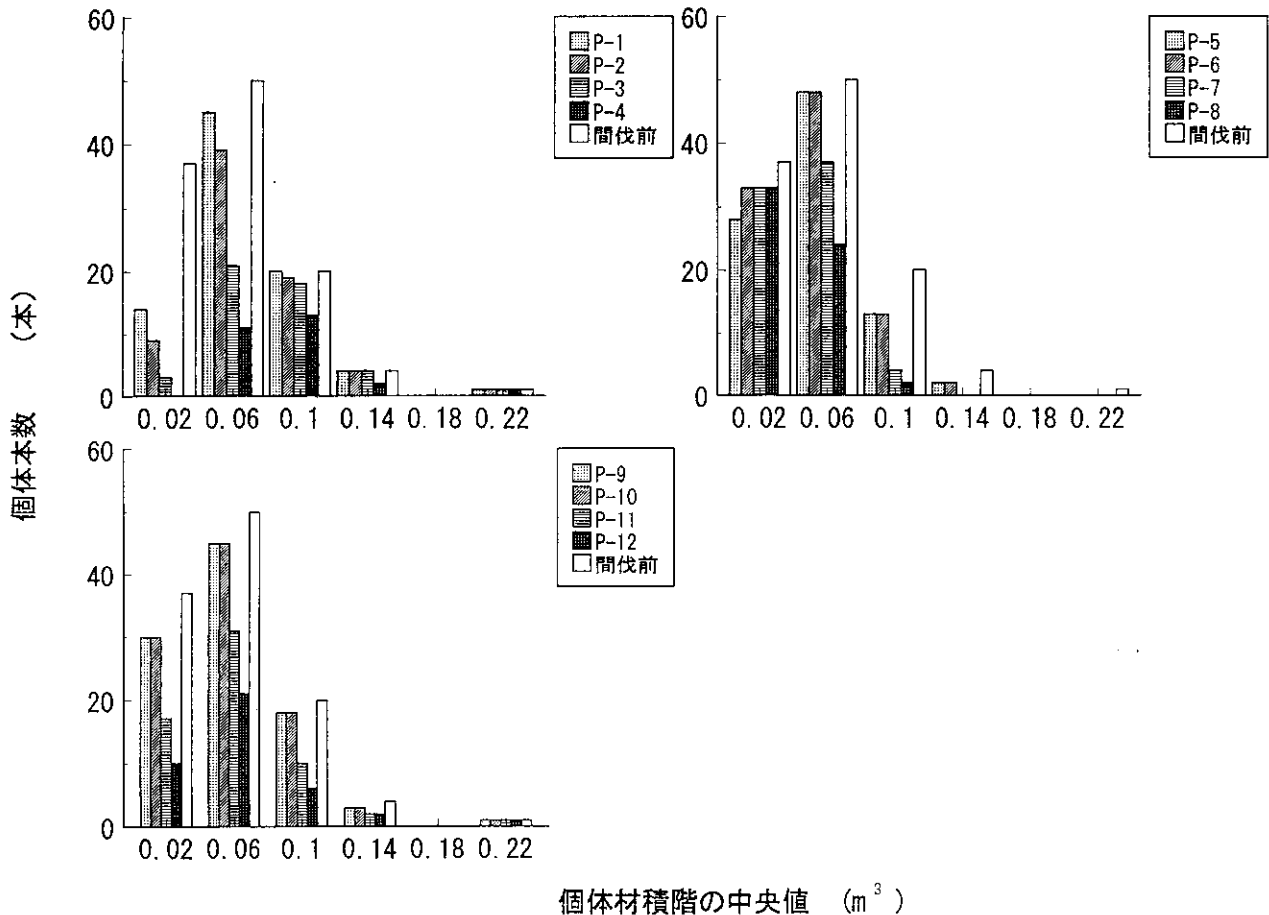


図-50 間伐ゲームにおける間伐案別の材積階頻度分布
P-1, 2...12は間伐案1, 2...12を示す。

胸高直径, 根元位置, 樹高) を利用した。ディスプレイ上に個体位置図と胸高直径を表示して, 間伐木を選木した。次のような考え方で間伐の強度や間伐個体のサイズが異なる12の間伐案と間伐を行わない案(間伐案0)を計画した。

個体の空間配置状態を考慮しながら, 間伐案1~4は小さい胸高直径の個体から, 間伐案5~8は大きい胸高直径の個体から, 間伐案9~12は胸高直径に関係なく間伐木を

選んだ。結果として, 間伐案1~4は小さな材積を持つ個体が間伐され(図-50, 表-6), 本数間伐率が材積間伐率より大きかったので下層間伐と区分できる。間伐案5~6は大きい個体材積を持つ個体が間伐され, 材積間伐率が本数間伐率より大きかったので上層間伐に区分した。ただし, 間伐案5は材積が小さい個体も間伐されていることや, 本数間伐率と材積間伐率の差が小さいことから全層間伐率に

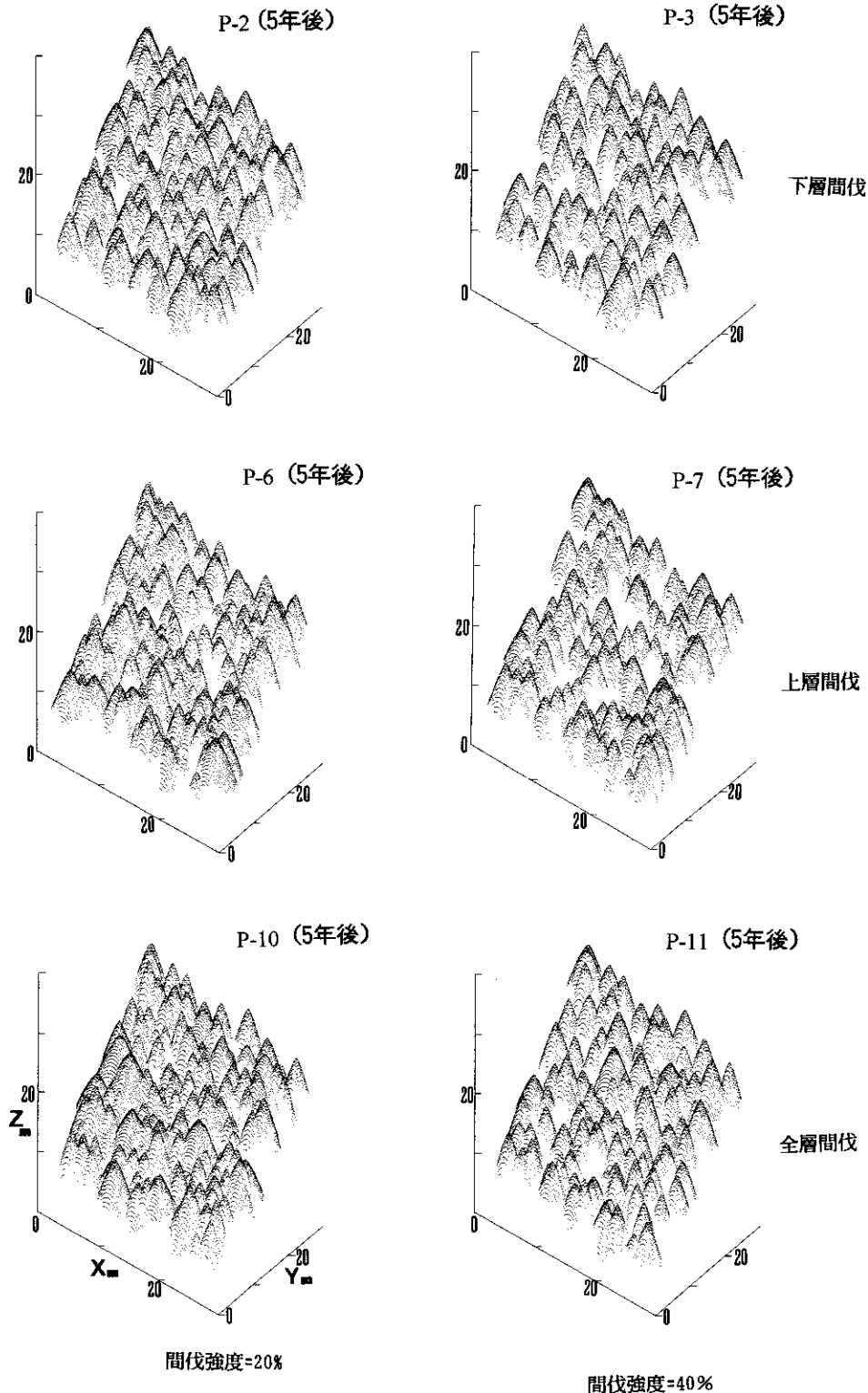


図-51 間伐種ごとの林冠立体構造の違い (平均樹高成長量が $0.5m \cdot yr^{-1}$ の例)

近い性質を持っている。間伐案9～12は間伐木の個体材積は小さいものから大きいものまでまんべんなく分布し、材積間伐率と本数間伐率はほぼ等しかったので全層間伐に区分した。以上のように、12の間伐案を間伐された個体のサイズの違いで下層間伐、上層間伐、全層間伐の3種類に区分した。この区分を間伐種と呼ぶことにする。間伐種別に材積間伐率がほぼ10%、20%、40%、60%の4段階になるように設定した(表-6)。これは間伐種間の比較をする場合、森林から伐採する生物量を一定にするという意味から材積間伐率を一定にして比較する必要があるためと、間伐種内での間伐の強度の影響を把握したかったためである。ただし、間伐案5と7はそれぞれ材積間伐率を10%と40%に設定したが、目標とする材積間伐率より多めに間伐された(このような目標間伐率と実行間伐率の違いは間伐作業の現場では頻繁に生じることであり、コンピュータ上で選木するとはいっても個体の空間配置を勘案しながら選木するかぎり目標間伐率と実行間伐率の違いを解消できない。特に大きな個体を伐採する上層間伐の場合目標の材積間伐率に近づけることは難しい)。材積間伐率別に10%区(間伐案1, 5, 9), 20%区(間伐案2, 6, 10), 40%区(間伐案3, 7, 11), 60%区(間伐案4, 8, 12)に区分し、この区分を間伐強度と呼ぶことにした。以上のように、この節では、間伐方法を間伐強度と間伐種の両面で考えて評価することにした。

樹高成長量は森林の立地条件を評価する場合の指標に用いられている⁽⁴⁷⁾。森林の育林指針はその森林の立地環境別に作成される必要があり、樹高成長量を基準に育林指針が作成されている場合が多い⁽⁶¹⁾。樹高成長量は間伐後の林分葉重量の回復に影響すると考えられる⁽³⁵⁾ので、樹高成長量が間伐後の個体の成長に及ぼす影響は無視できない。本モデルでは図-33であきらかなように、林分の平均樹高成長量を任意に設定できるので、間伐後の樹高成長量が葉重量や材積成長量に及ぼす影響を知ることができる。岡山県内の20年生スギ林の平均樹高成長量は $0.3\sim 0.7\text{ m}\cdot\text{yr}^{-1}$ の範囲にあった⁽⁶¹⁾。そこで入力する平均樹高成長量を $0.5\text{ m}\cdot\text{yr}^{-1}$ を中心にして、 $0.3, 0.5, 0.7\text{ m}\cdot\text{yr}^{-1}$ の3段階に設定した。

以上述べた条件で、Plot 1の陽樹冠形状関数パラメータと着葉分布密度関数のパラメータを用いて、間伐後の着葉構造の変化や個体材積の成長についてシミュレートした。モデルによる間伐実験の結果を解析する場合、対象林の境界に隣接する個体を解析から除くために、中央に $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ の解析用のサブプロットを設けて、この中の個体について解析の対象とした。

6.2.2 モデルによる間伐実験の結果と考察
林冠表面形状の変化

5年後の林冠立体図の間伐種間の比較を行った(図-51)。上層間伐を行った場合、個体の配置が不均一で個体ごとの粗密の差が大きく、樹冠サイズのバラツキが大きい。一方下層間伐の場合、個体の配置が均等で、樹冠サイズも均一である。このように森林景観は間伐方法によって大きく印象が異なる。

間伐直後の林冠孔隙率は材積間伐率と直線関係にあり、

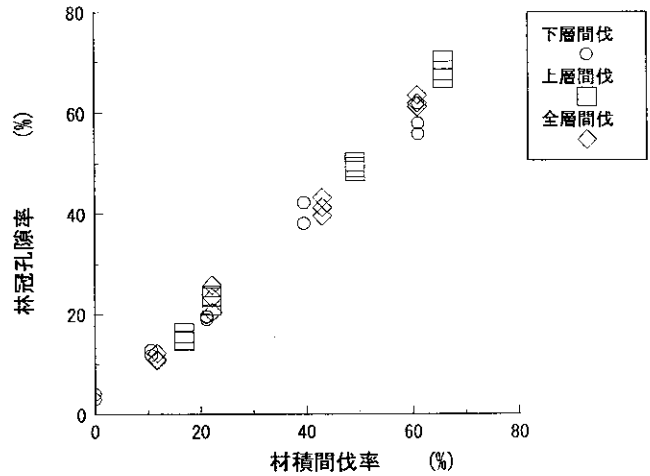


図-52 材積間伐率と間伐直後の林冠孔隙率の関係

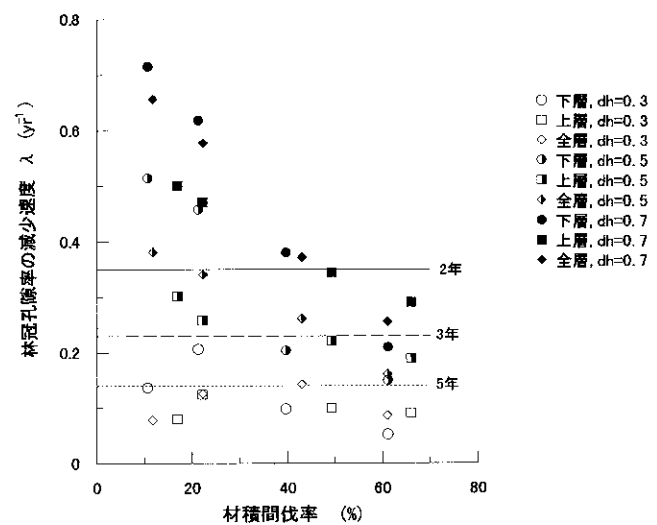


図-53 材積間伐率と間伐後の林冠孔隙率の減少速度λの関係
dhは平均樹高成長量($\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$)を示す。図内の数字は間伐直後の林冠孔隙率が半分になるまでの年数で、線はそのときのλの値を示す。

間伐種による違いは明らかでなかった(図-52)。前章で間伐後の林冠孔隙率の減少は指数関数的であり、減少速度λは7式で計算されることを述べた。そこでモデルによる間伐実験結果の林冠孔隙率の減少速度λを比較した(図-53)。林冠孔隙率の減少速度λは材積間伐率が大きいほど小さかった。また間伐強度が小さい10%区と20%区の場合に上層間伐は他の間伐種に比べてλが小さかった。このように間伐強度や間伐種で林冠孔隙率の減少速度λに差が見られた原因として次のことがあげられる。間伐強度が大きいとき隣接しあう個体を同時に伐採する場合が生じて、一つの林冠の孔の大きさが大きくなる。また上層間伐の林冠の孔は分布が不均一で一つの林冠の孔の大きさが大きくなる。本モデルの場合、林冠の孔に隣接する個体の樹冠半径は樹高成長量に伴って変化し、他の個体と接するまでは林冠の孔の大きさに無関係であるといえる(図-24参照)ので、林冠の孔が被覆される速度は小さな孔のほうが大きい。このため、間伐強度が大きい場合や上層間伐を行った場合、林冠孔隙率の減少速度は小さくなったと考える。なお間伐強

度が大きくなると間伐種間の違いが明らかでなくなったが、大きい間伐強度の場合一つの林冠の孔が複数で構成されるため、一つの孔の大きさについて間伐種の違いは小さくなるであろうと考えた。強い間伐や上層間伐を行った場合の樹冠回復の遅れは現実林分でも安藤⁽⁹⁾が指摘するように十分に起こりうるものと考えた。

平均樹高成長量が大きいほど林冠孔隙率の減少速度 λ は大きくなった。材積間伐率が10~30%の場合、平均樹高成長量が0.3, 0.5 $\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ のとき、 λ は0.08~0.2, 0.25~0.5 yr^{-1} で図-37の過去に報告された相対照度の変化から計算された減少速度とほぼ等しかった。間伐直後の林冠孔隙率の半分になるまでの期間で比較すると、平均樹高成長量が0.3 $\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ のとき材積間伐率にかかわらずほぼ5年以上で、この場合間伐強度や間伐種による違いはあきらかでなかった。しかし、0.5 $\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ のとき材積間伐率が40%以上で3~5年で、20%以下の場合2年未満で間伐時の半分の林冠孔隙率になった。

着葉構造の変化

間伐直後の林分葉重量は無間伐の22~25 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ から材積

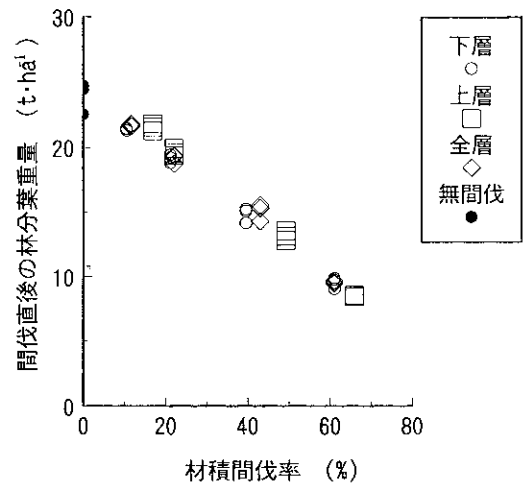


図-54 材積間伐率と間伐直後の林分葉重量の関係

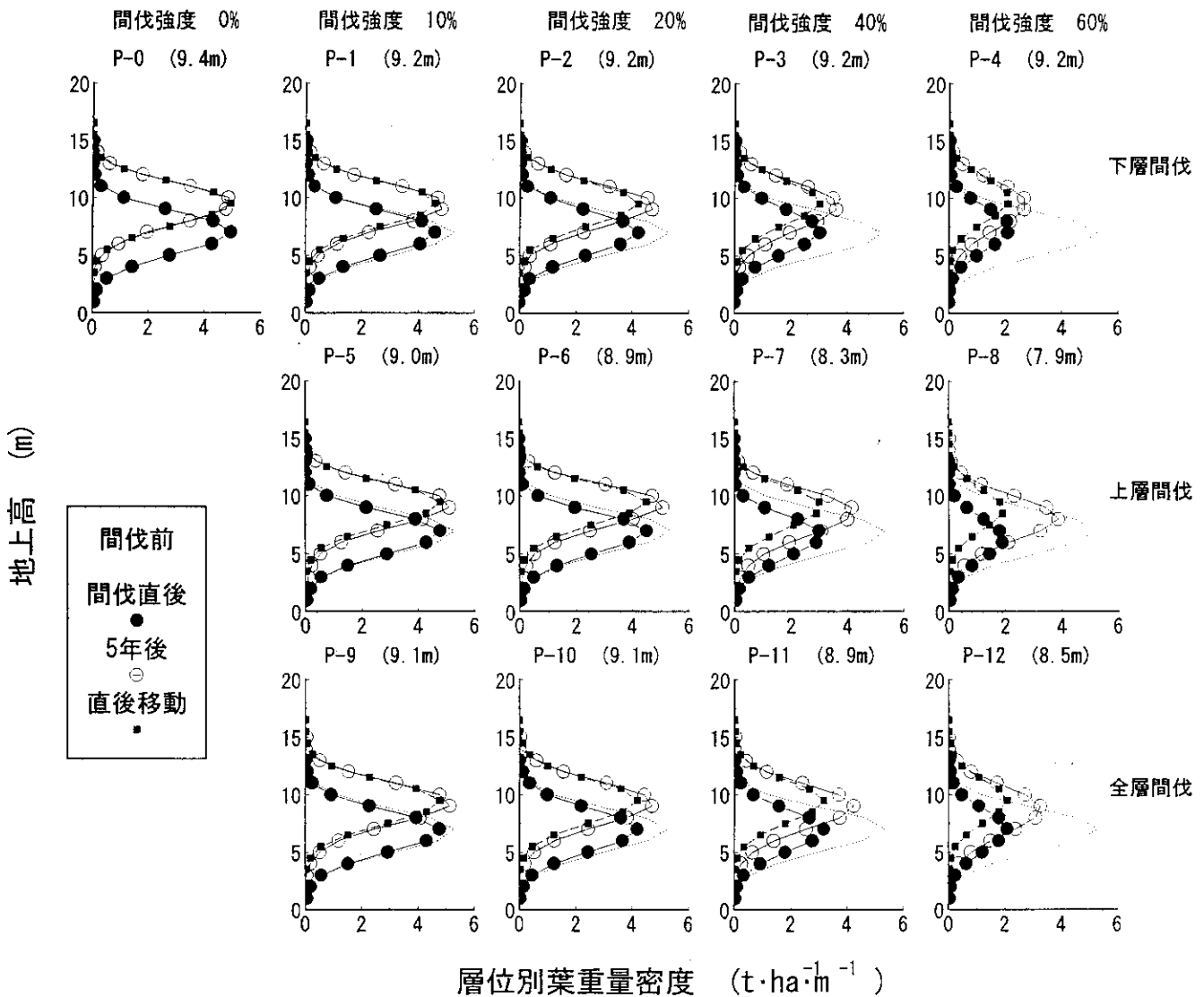


図-55 間伐案ごとの葉の垂直分布の比較 (平均樹高成長量=0.5 $\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ の例)

直後移動は間伐直後の分布状態を2.5m上方へ(5年間の樹高成長量分、梢の方向へ)平行移動させた分布形を示す。図中の数字は5年後の葉の重心高を示す。

間伐率が大きくなるほど減少し、その減少割合は材積間伐率とほぼ1:1の関係にあり(図-54)、間伐種による違いはあきらかでなかった。Satooは⁽⁷⁹⁾若いスギ林で林分葉重量の減少割合と材積間伐率に1:1の関係がみられることを示しており、間伐種によってこの関係が変わらないことを示した。このことはモデルによる間伐実験結果と一致した。

平均樹高成長量が $0.5\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ の場合の葉の垂直分布について間伐案間の違いを比較した(図-55)。間伐直後の着葉分布構造は間伐種によって差が見られた。下層間伐の場合、小さい個体を間伐したため地上高が高い部分の葉より低い部分の葉をより多く取り除いたことになる。結果として、1mの層ごとの林分葉重量(層別葉重量密度と呼ぶ)は全体的に小さくなり、葉の垂直的な重心の位置(葉の重心高と呼ぶ)は高くなった。一方、上層間伐の場合、大きい個体を間伐したため高い部分の葉を多く取り除いたことになり、結果として層別葉重量密度は小さくなり葉の重心高は低くなった。全層間伐の場合、各階層の葉をまんべんなく取り除いたことになり、層別葉重量密度は小さくなったが、葉の重心高は変化しなかった。

樹木のプロフィール理論では葉の垂直分布がその形を変えずに時間とともに上方へ平行移動することが重要な仮定の

一つである。この仮定が間伐実施後でも成り立つかどうかを知るために、間伐直後の葉の垂直分布をそのまま平均樹高成長量分(5年間で2.5m)だけ上方へ平行移動した葉の分布形と5年後の葉の垂直分布とを比較した。無間伐の場合や10%区のように間伐強度が小さい場合には、いずれの間伐種とも間伐後の葉の垂直分布の形は時間が経過してもあまり変化せず、間伐直後の分布形を上方へ平均樹高成長量分だけ平行移動したものと5年後の分布形はほぼ一致した。すなわちこの場合には林冠上部では樹高成長に伴って着葉可能空間が発達し、林冠の下部では葉が枯れ上がるため、葉の垂直分布がその形を変えずにそのまま上方へ平行移動したものと考え、樹木のプロフィール理論はなりたつ。一方20%~60%区の場合には、いずれの間伐種においても、林冠中部から下部の層別葉重量密度は5年後の方が間伐直後の葉重量分布を平均樹高成長量分だけ平行移動したものに比べて大きかった。しかし林冠上部では大きな違いは見られなかった。すなわち間伐後の時間経過に伴って、林冠下部の層別葉重量密度が大きくなりながら葉の分布範囲は上方へ移動した。間伐直後の葉の垂直分布が時間に伴って平均樹高成長量分だけ上方へ移動するだけではなく、林冠中部から下部の葉重量が増加し、この場合にプロフィール理論はなりたたない。

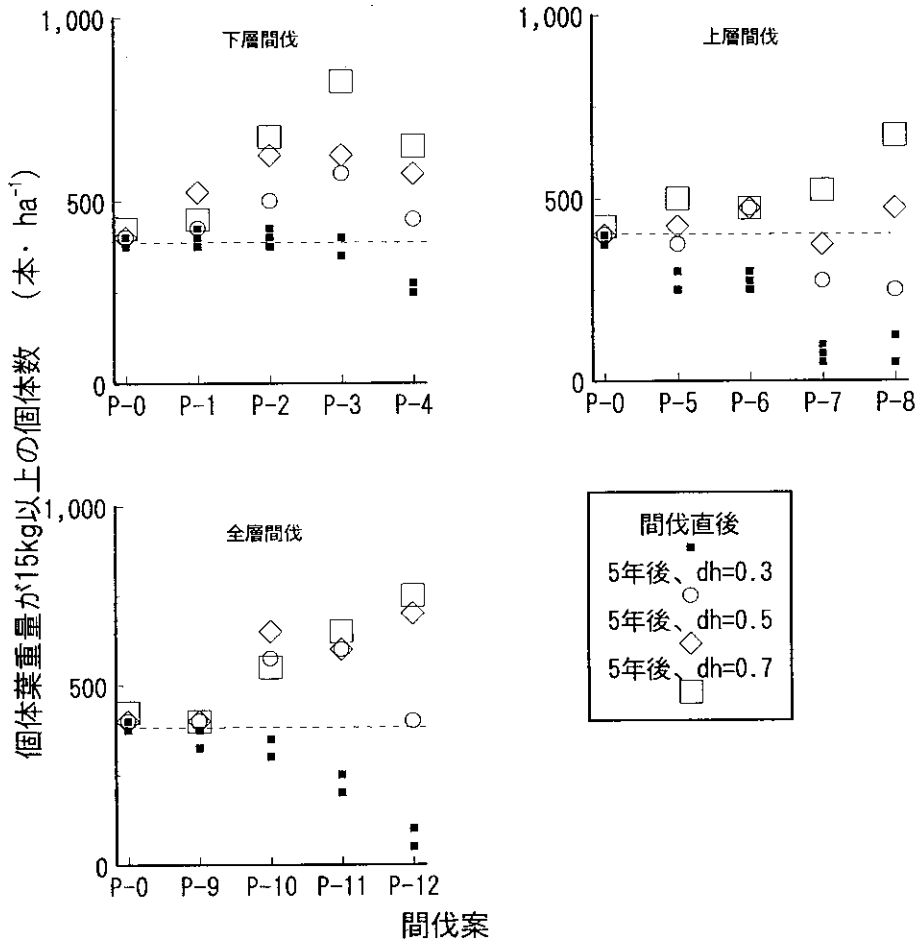


図-56 間伐案ごとの個体葉重量が15kg以上の個体数(間伐後5年目)の比較
 図中の線は無間伐5年後の平均値を示す。

5年後の葉の重心高は無間伐が最も高く、ついで下層間伐、全層間伐、上層間伐の順になった。上層間伐と全層間伐の場合、5年後の葉の重心高は間伐強度が強くなるにつれて低くなり上層間伐の60%の場合が最も低かった。

次に間伐が個体の葉重量に及ぼす影響を知るために15kg以上の葉重量を持つ個体数を比較した。下層間伐は主に小さい個体を伐採するので、葉重量15kg以上の個体数は間伐直後あまり減少しない。ところが、上層間伐や全層間伐の場合では、大きな個体が伐採されるので、間伐直後に15kg以上の葉重量を持つ個体は無間伐の場合に比べて少なくなった。しかし、5年後には15kg以上の葉重量を持つ個体は無間伐の場合と等しいかむしろ多くなった(図-56)。なお、この傾向は樹高成長量が大きいほど顕著だった。

個体葉重量の増加量は無間伐の場合ほぼ0で、材積間伐率が大きくなるほど大きかった(図-57)。間伐種別に間伐強度を要因として分散分析したところ、すべての間伐種別に間伐強度間で有意差があった($P < 0.001$)。一方間伐種間であきらかな傾向が見られず、間伐強度別に間伐種を要因として分散分析したところ、すべての間伐強度別に間伐種間で有意差がなかった($P > 0.05$)。また、平均樹高成長量が大きいほど個体葉重量の変化量は大きかった。間伐種別、間伐強度別に平均樹高成長量を要因として分散分析したところ、間伐強度が20%以下では平均樹高成長量間に有意差が認められない場合もあったが、間伐強度が40%以上の場合全ての間伐種で平均樹高成長量間に有意差があった(表-7)。間伐強度が大きい場合には林冠孔隙が大きいいため、残存個体の樹冠が拡張できる空間が多い。樹高成長量が大きい場合ほど大きく開いた空間を速やかに利用することができるので、間伐強度が大きい場合に樹高成長量の影響が強く現れたものと考えられる。

材積

間伐後の林分材積成長量を無間伐の林分材積成長量と等しいと仮定して議論が進められる場合がある⁽³⁹⁾。ところが、実際には間伐後の林冠修復過程では林分葉重量は無間伐の

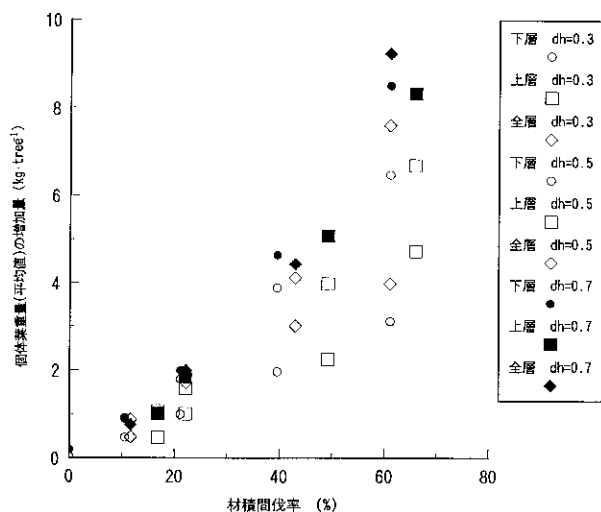


図-57 間伐後5年間の個体葉重量(平均値)の変化量と材積間伐率の関係
dhは平均樹高成長量($m \cdot yr^{-1}$)を示す。

場合に比べて小さいので、間伐後の林分材積成長量は無間伐の場合より小さいことはあきらかである。そこで無間伐の5年間の林分材積成長量に対する百分率を間伐案別に求めた(図-58)。樹高成長量が大きいほど百分率は大きく、間伐強度別にみると直線関係が得られた。この直線の切片は材積間伐率に等しく、直線の傾きは材積間伐率が大きいほど大きかった。

間伐後の個体材積成長量は間伐直後の個体材積と相関がある(図-44参照)ので、残存木の個体材積が異なる間伐案について材積成長量を単純に比較することはできない。そこで、5年間の材積の相対成長率 R.G.R. を求めて間伐案間の比較をすることにした。初期の個体材積が小さい場合には R.G.R. は大きなバラツキがあり、初期個体材積が大きくなるほど R.G.R. は一定の値 $0.1yr^{-1}$ に近づいた(図-59)。R.G.R. が初期材積によって分布パターンが異なったので、間伐前の個体材積を $0.04m^3$ 未満(小さい木)、 $0.04 \sim 0.07m^3$ (中程度の木)、 $0.07m^3$ 以上(大きい木)の

表-7 個体葉重量の平均樹高成長量間の有意差検定(分散分析による検定)

間伐種	間伐強度	
無間伐	0%	$P < 0.05$
	10%	$P < 0.05$ (ns)
	20%	$P < 0.05$
下層間伐	40%	$P < 0.01$
	60%	$P < 0.01$
	10%	$P < 0.05$
上層間伐	20%	$P > 0.05$ (ns)
	40%	$P < 0.01$
	60%	$P < 0.01$
全層間伐	10%	$P > 0.05$ (ns)
	20%	$P > 0.05$ (ns)
	40%	$P < 0.05$
	60%	$P < 0.05$

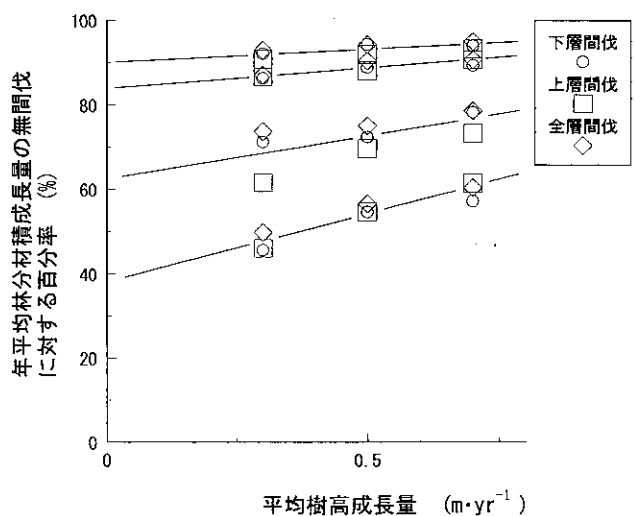


図-58 間伐後5年間における年平均林分材積成長量の無間伐に対する比と平均樹高成長量との関係

グループに区分して R.G.R. の平均値を比較した (図-60)。

間伐種による個体材積の R.G.R. の違いは明らかでなかった。間伐強度別、平均樹高成長量別、大きさのグループ別に間伐種を要因として Kruskal-Wallis の検定により有意差を検定したところ、すべての間伐強度、平均樹高成長

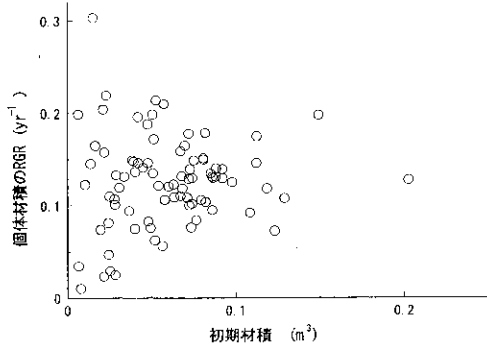


図-59 初期の個体材積と個体材積の R.G.R. の関係
(間伐案10の平均樹高成長量=0.5m・yr⁻¹の例)

表-8 個体材積の R.G.R. の間伐強度間の有意差検定
(Kruskal-Wallis による検定)

平均樹高成長量	間伐種	小さい木 (<0.04m ³)	中程度の木 (0.04~0.07m ³)	大きい木 (>0.07m ³)
0.3m	下層	P>0.05 (ns)	P<0.01	P>0.05 (ns)
	上層	P<0.05	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)
	全層	P<0.01	P<0.01	P>0.05 (ns)
0.5m	下層	P>0.05 (ns)	P<0.01	P<0.01
	上層	P<0.01	P<0.01	P<0.01
	全層	P<0.01	P<0.01	P<0.01
0.7m	下層	P>0.05 (ns)	P<0.01	P<0.01
	上層	P<0.01	P<0.01	P>0.05 (ns)
	全層	P<0.01	P<0.01	P<0.01

量で間伐種間に有意差はなかった ($P > 0.05$)。川崎ら⁽³⁷⁾は20年生のヒノキ林を上層間伐及び下層間伐し、その後の直径成長を調べたところ、材積間伐率の等しい上層間伐と下層間伐では同じ個体サイズの場合、間伐後の年輪幅に大きな違いがないことを報告した。本モデルによる間伐実験の結果はこれに一致した。

間伐強度が大きくなるほど個体材積の R.G.R. の平均値は大きかった。間伐種別、平均樹高成長量別、大きさのグループ別に間伐強度を要因として Kruskal-Wallis の検定により R.G.R. の有意差を検定した (表-8)。小さい木の場合、下層間伐以外で有意差があった。下層間伐で有意差がなかったのは、下層間伐で小さい個体が伐採されてサンプル数が少なかったためである。中程度の木の場合、ほと

表-9 個体材積の RGR の平均樹高成長量間の有意差検定
(Kruskal-Wallis による検定)

間伐強度	間伐種	小さい木	中程度の木	大きい木
0%		P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)	P<0.05
10%	下層	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)
	上層	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)	P<0.05
	全層	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)
20%	下層	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)
	上層	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)
	全層	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)
40%	下層	P>0.05 (ns)	P<0.05	P<0.01
	上層	P<0.01	P<0.01	P<0.05
	全層	P>0.05 (ns)	P<0.05	P<0.05
60%	下層	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)	P<0.01
	上層	P<0.01	P<0.01	P>0.05 (ns)
	全層	P>0.05 (ns)	P>0.05 (ns)	P<0.01

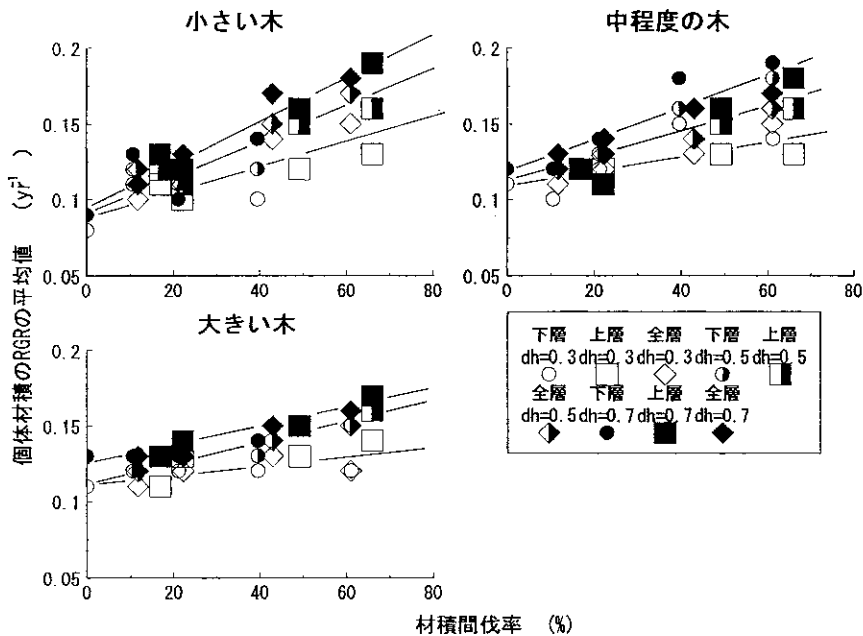


図-60 個体材積の R.G.R. の平均値と材積間伐率の関係
dh は平均樹高成長量 (m・yr⁻¹) を示す。

んどの間伐種別、平均樹高成長量別で有意差があった。大きい木の場合、平均樹高成長量が $0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ のときに有意差がなかったが、 $0.5\sim 0.7\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ では有意差があった。

平均樹高成長量が大きいほど個体材積の R.G.R. の平均値は大きかった。間伐強度別、間伐種別、大きさのグループ別に平均樹高成長量を要因として Kruskal-Wallis の検定により有意差を検定したところ、間伐強度が40%より大きいときに有意差があった(表-9)。すなわち、間伐強度が大きいほど樹高成長量の影響があらわれやすいと考えた。

材積間伐率の変化に伴う個体材積の R.G.R. の変化(図-60の直線の傾き)を大きさのグループ別に比較したところ、大きい木では小さい木や中程度の木に比べて小さかった。大きい木は間伐の有無に関わらず大きな着葉空間を持つので、材積成長量は間伐の影響を受けにくいと考える。特に平均樹高成長量が小さい場合には間伐の影響が現れにくく、大きい木で平均樹高成長量が $0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ の場合に間伐強度間に有意差がなかったのはこのためであろう。河原ら⁽³⁹⁾は大きい個体について間伐の影響があらわれにくいことを述べており、山本⁽⁹⁹⁾は林分密度が個体の胸高断面積成長率に及ぼす影響は林分内の小さい木ほど大きいことを報告している。モデルによる間伐実験の結果はこれらの報告と一致した。

菊沢⁽³⁹⁾は間伐効果を判定する場合、平均値ではなく所定

の大きさに達した木の数で比較する必要性を述べ、Y-N 曲線⁽³⁹⁾により間伐効果を判定する方法を提唱した。すなわち図-61において説明するとY-N 曲線上で間伐後の曲線の左下の一部が無間伐の曲線より上側に位置した場合に間伐効果があると報告した(以下、この効果を「菊沢の間伐効果」と呼ぶ)。そこで、平均樹高成長量が $0.7\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ の場合についてモデルによる間伐実験の結果からY-N 曲線を描き、間伐種間の比較を行った(図-61)。ここで $0.7\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ の場合について表したのは、この場合が間伐後の変化が激しく、それぞれの特性がわかりやすいと考えたためである。

下層間伐は間伐直後に無間伐の場合のY-N 曲線の右上が途中切れの形となった。5年後は無間伐よりやや上側に位置し「菊沢の間伐効果」は認められたが、無間伐とほぼ同じ曲線形で効果は小さかった。年数を経過しても無間伐の場合とほぼ同様の曲線で変化するものと考えられ、大きな「菊沢の間伐効果」はみられないであろう。下層間伐のこのような特性は菊沢⁽³⁹⁾も指摘している。

全層間伐は間伐直後に無間伐の場合より左下に位置し、曲線の傾きは小さくなった。5年後に左下の一部は無間伐の場合とほぼ一致した。すなわち「菊沢の間伐効果」は現れていないといえる。菊沢⁽³⁹⁾の報告でも全層間伐の場合間伐後5年目では間伐効果が現れていない。しかし、全層間伐のY-N 曲線の傾きが緩やかになったので、このまま年

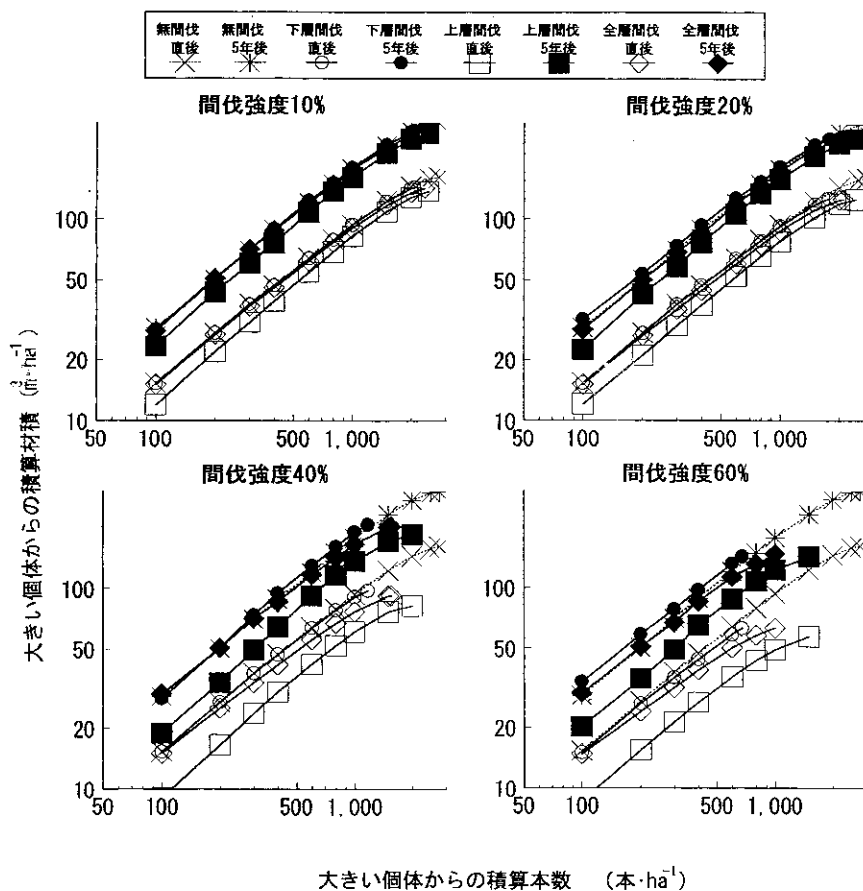


図-61 間伐案ごとのY-N 曲線の変化
(平均樹高成長量= $0.7\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ の例)

表-10 5年後の個体材積の変動係数

材積 間伐率	無間伐			下層間伐			上層間伐			全層間伐		
	0.3 m・yr ⁻¹	0.5 m・yr ⁻¹	0.7 m・yr ⁻¹	0.3 m・yr ⁻¹	0.5 m・yr ⁻¹	0.7 m・yr ⁻¹	0.3 m・yr ⁻¹	0.5 m・yr ⁻¹	0.7 m・yr ⁻¹	0.3 m・yr ⁻¹	0.5 m・yr ⁻¹	0.7 m・yr ⁻¹
0%	0.61	0.6	0.62									
10%				0.48	0.47	0.47	0.49	0.51	0.52	0.58	0.57	0.59
20%				0.46	0.46	0.50	0.54	0.52	0.57	0.56	0.63	0.58
40%				0.36	0.38	0.33	0.55	0.54	0.52	0.55	0.58	0.53
60%				0.32	0.31	0.31	0.59	0.60	0.58	0.51	0.52	0.47

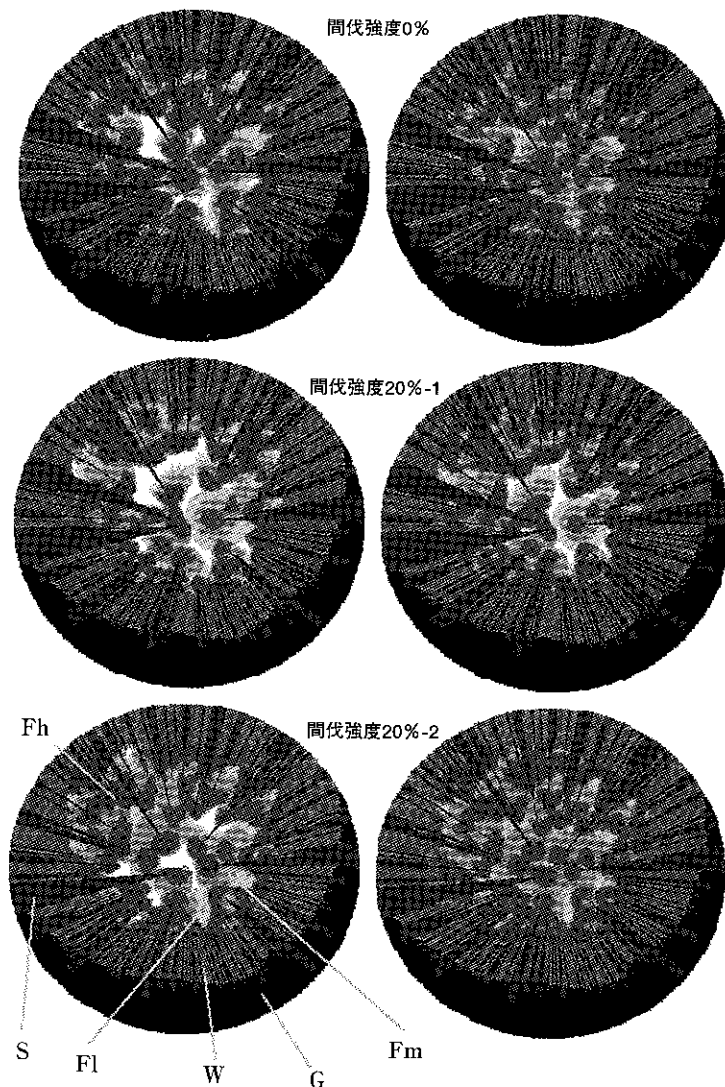


図-62-A 間伐強度別ののにせ全天空写真 (左側：間伐直後，右側：間伐5年後)
 にせ全天空写真の凡例は図-45に同じ。

数が経過して成長がすすむと左下の一部が無間伐の曲線より大きく上側に位置すると考えられる。したがって，将来大きな「菊沢の間伐効果」が期待できると考えた。

上層間伐は間伐直後に無間伐の場合より左下に位置し，曲線の傾きは大きくなった。5年後においても無間伐より下側に位置し，「菊沢の間伐効果」は現れていない。安藤の報告⁽⁵⁾の場合でも，上層間伐5年目に大きな胸高直径をもつ個体は無間伐のそれに比較して少なく，モデルによる間伐実験の結果はこれに一致した。

間伐種ごとの間伐後の個体材積のバラツキを知るために，5年後の個体材積の変動係数を比較した(表-10)。下層間伐の変動係数は最も小さく，下層間伐によって個体材積は均一化した。これは間伐直後に小さい個体材積の個体が失われ，間伐後に個体の材積のバラツキが小さくなったためと，間伐後に生じた林冠の孔隙が均等に配置され(図-51)，樹冠サイズが均一となり，成長量のバラツキが小さかったことが原因であろう。

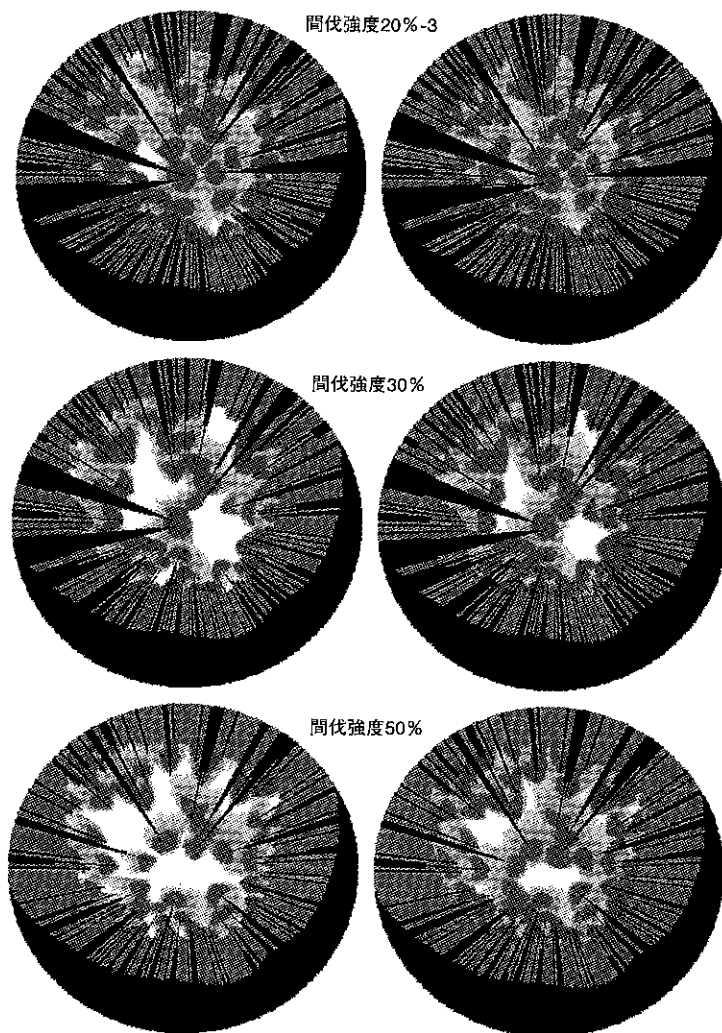


図-62-B 間伐強度別のにせ全天空写真 (左側：間伐直後, 右側：間伐5年後)

ま と め

間伐が個体材積の R.G.R. や個体葉重量に及ぼす影響は、間伐強度によって違いがみられたが、間伐種によって違いがみられなかった。すなわち、いずれの間伐種を選んでも間伐強度が同じであれば個体材積の R.G.R. 及び個体葉重量に与える効果は変わらなかった。間伐後の樹高成長量の影響は間伐強度が大きい場合に大きかった。また個体材積の R.G.R. に及ぼす間伐の影響は大きな個体で小さかった。材積の頻度分布の変化に注目すると、下層間伐の「菊沢の間伐効果」は間伐後早期にあらわれるが、その効果は小さかった。一方全層間伐の「菊沢の間伐効果」があらわれるのは遅いが、その効果は大きいと考えられた。このように間伐種は個体サイズの頻度分布の面でお互いに違いがみられた。

6.3 間伐強度が林床の光環境に及ぼす影響の評価

6.3.1 方 法

Plot 2 の毎木調査データを用いて、個体番号を用いて機械的に20%、33%、50%の本数間伐を実施した。たとえば20%間伐であれば、個体番号5、10、15、20……の木を間伐することとした。個体番号は毎木調査時に測定者の歩行順につけているので、間伐木は林内にほぼ均等に配置さ

れ、間伐木のサイズが特定の個体サイズに偏ることがなく全層間伐であるといえる。陽樹冠形状関数のパラメータ、着葉分布密度関数のパラメータについて、Plot 2 の値をそのまま用いて、平均樹高成長量が $0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ の場合について間伐直後と5年後の林冠表面形状及び林内の葉の分布状態を推定した。

プロットの中央の一点(図-6のセンサー5の位置)についてにせ全天空写真を作成し、4月18日の曇天時の林外の光量子束密度のデータを用いて、曇天時の相対光量子束密度を推定した。

6.3.2 モデルによる間伐実験の結果と考察

間伐強度が大きいほどにせ全天空写真上の林冠の孔隙は大きくなった(図-62)が、間伐5年後には減少した。

相対光量子束密度と林冠孔隙率には密接な関係がみられた(図-63)。間伐直後の相対光量子束密度は図中の1:1の直線よりやや下にあり、5年後の光量子束密度は1:1の直線よりやや上に位置したが、大まかに見ると両者の関係は1:1の関係にあり、林冠孔隙率は相対光量子束密度の目安になると考えた。

間伐後の相対光量子束密度の減少速度 λ は材積間伐率にはあまり関係がなく、 0.1yr^{-1} 前後であった(図-64)。これ

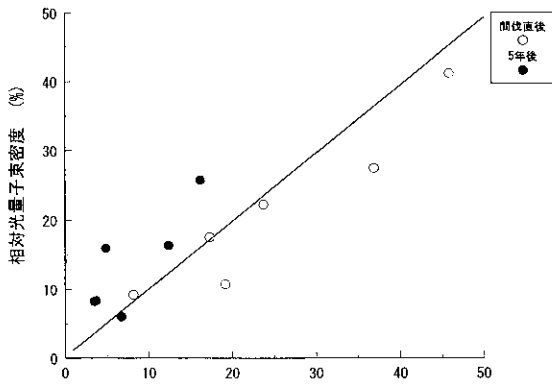


図-63 林冠孔隙率と曇天時の相対光量子束密度の関係

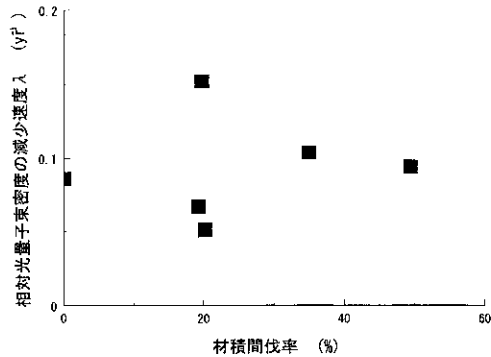


図-64 材積間伐率と相対光量子束密度の減少速度λの関係

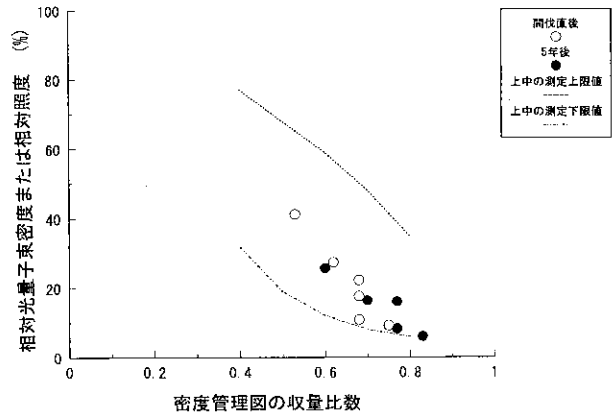


図-65 収量比数と相対光量子束密度及び相対照度の関係

表-11 間伐種と間伐特性

項目	下層間伐	全層間伐	上層間伐
個体の粗密を調整する。	易		難
個体の大きさがそろった林を作る。	易	難	難
菊沢の間伐効果(目標とする大きさに達する個体の数を増やす。)	効果の大きさ 早い	大 遅い	なし 遅い
残存木の材積成長を促進する。		←等しい→	
間伐時に収入を得る。(収入の大きさ)	小	中間	大
葉重量の重心位置	高い	中間	低い

は図-38の従来報告されている相対光量子束密度の変化から計算した減少速度とはほぼ同じであった。

上中からは⁽³⁴⁾林内の相対照度と密度管理図の収量比数とが密接な関係にあることを報告している。そこで密度管理図⁽⁶⁹⁾から収量比数を求めて、相対光量子束密度との関係を調べた(図-65)。収量比数が高くなるほど相対光量子束密度は減少し、その関係は上中ら⁽³⁴⁾が多数のヒノキ林分で測定した範囲内にあった。

このように林内の相対照度は林冠孔隙率や収量比数を目安に制御することが出来る。特に林冠孔隙率は材積間伐率と密接な関係があるので、間伐の作業計画時の有効な目安になると考える。

第5章で指摘したように光量子束密度の弱い部分での推定精度に問題があったので、間伐後の光環境の変化を正確に把握しようとするためには本モデルをさらに改良する必要がある。しかし、間伐後の相対光量子束密度の変化や収量比数と相対照度との関係などで、従来の報告と一致することから、本モデルによる間伐実験の結果は有効であると言える。

第7章 間伐方法に関する総合論議

前章まで、林冠動態モデルの内容とその適用例について述べた。有効性が確かめられた本モデルを用いて、間伐後の林冠回復過程における着葉構造、個体材積、林床の光環境に関して、間伐方法ごとの特性を評価し、いくつかの知見を得ることができた。ここではモデルによる間伐実験によって得られた知見にもとづいて、間伐作業方法について

論議してみたい。

間伐の作業計画をたてる場合、間伐の間隔、間伐種(前章で述べたように上層間伐か下層間伐かなどの間伐木の大きさによって区分した)、間伐強度(材積間伐率)を決定する必要がある。たとえば間伐の間隔は間伐に要するコストや労力の頻度を決定する重要な項目である。間伐種は間伐時の収益性に関係し、間伐後の個体サイズの頻度分布に大きな影響を及ぼすので(図-61)、重要である。間伐強度は個体の葉重量や個体材積成長量あるいは林床の光環境に大きな影響を及ぼすので重要である。そこで以下、間伐種、間伐の間隔、間伐強度のそれぞれの項目について議論することにする。

7.1 間伐種(間伐木の大きさ)

モデルによる間伐実験の結果、下層間伐、上層間伐、全層間伐のあいだで個体葉重量や個体材積の R.G.R. は大きく違わなかった。しかし、林分葉重量の垂直分布や、林冠孔隙率の減少速度及び個体材積の頻度分布は間伐種によって違いが見られた。そこでモデルによる間伐実験によって把握したそれぞれの間伐種の特性を評価し、表-11にとりまとめた。

7.1.1 下層間伐

下層間伐は、間伐木のサイズは小さく、間伐本数が多いため、間伐後に生じる林冠の孔が均等に生じ、林分の個体の粗密が小さい(図-51)。このため、個体の大きさのそろった林を作りやすい(表-10)。目標の大きさに達した個体の数を増やすという「菊沢の間伐効果」はあらわれるのが早いとその効果は小さかった(図-61)。

図-51に示した葉の重心高は全層間伐や上層間伐に比べて高く、無間伐とはほぼ同じで不安定な葉の分布状態をしている。

7.1.2 全層間伐

全層間伐は、「菊沢の間伐効果」があらわれるのは遅いがその効果は大きいと予想された(図-61)。たとえば柱口の木材を生産しようとする場合に、目標とする径級に達する個体を増やすことが求められる。このような場合に、短期的には下層間伐が、長期的には全層間伐が有効であろう。

また、個体材積の変動係数が最も大きく(表-10)、多様な個体サイズの林を作りやすいと予想された。

7.1.3 上層間伐

上層間伐は、「菊沢の間伐効果」は間伐後5年目では現れず、Y-N曲線の変化からも将来、大きな「菊沢の間伐効果」を予想することはできなかった(図-61)大きな個体を中心に伐採する上層間伐では「菊沢の間伐効果」を期待することに無理があるのかもしれない。

間伐5年後の樹冠の重心高は最も低く、垂直方向のバランスという意味では最も安定的な葉の分布状態をしている。

上層間伐は間伐時の収入を第一義として行われ、同時に年輪幅の大きい個体の除去を目的としている場合が多い^(5,37,64)。これらの点については本モデルによって予測するまでもなく、他の間伐種に比べて有利であることはあきらかである。しかし、一方で上層間伐をすれば残存木の保育の面で劣るかもしれないというイメージが森林経営者のあいだで根強い。モデルによる間伐実験において上層間伐の残存木の成長(材積のR.G.R.や個体葉重量など)に与える効果が下層間伐や全層間伐に比べて違いがなかったことから、気象害の危険が少ないところでは、目標に応じて上層間伐を積極的に行うことは可能であると考えた。

7.2 間伐の間隔

7.2.1 複層林施業を目的として間伐する場合

複層林施業を目的として間伐を行う場合には、林床の光環境の制御が重要である。林床の相対照度は林冠孔隙率と密接な関係にあった(図-63)ので、林冠孔隙率の変化は間伐間隔の目安となりうると考えた。複層林の造成の場合、下木は相対照度20%で成長が低下し始めると言われている^(7,94)。そこで、林冠孔隙率が20%になるまでの期間(表-12)を間伐間隔の目安にすると、材積間伐率が40%の場合に平均樹高成長量が $0.5\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ 以上では5年以下の間隔で、材積間伐率が60%の場合に平均樹高成長量が $0.7\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ では5年以下の間隔で間伐を行う必要がある。

二度目の間伐の場合、間伐前には林冠が閉鎖状態ではないので、間伐直後の林冠孔隙率が不明であるため、林冠孔隙率が20%になるまでの期間を直接求めることはできない。そこで、間伐直後の林冠孔隙率の半分になった時に再度間伐するという計画を設定すると、平均樹高成長量が $0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ 以下では間伐間隔が5年前後であるが、 $0.5\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ 以上では5年以下であった(図-53)。また平均樹高成長が $0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ のときの相対光量子密度の減少速度は 0.1yr^{-1} 前後で(図-64)、相対光量子束密度の変化を指標とした場合も、林冠孔隙率の場合と同様に、平均樹高成長量 $0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ で

表-12 林冠孔隙率が20%になるまでの期間

間伐種	間伐強度	平均樹高成長量		
		$0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$	$0.5\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$	$0.7\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$
下層間伐	40%	7yr	3.5yr	2 yr
	60%	10yr<	7 yr	5 yr
上層間伐	40%	9yr	4 yr	3 yr
	60%	10yr<	7 yr	4.5yr
全層間伐	40%	5yr	3 yr	2 yr
	60%	10yr<	7 yr	4 yr

表-13 林冠孔隙率が3%になるまでの期間

間伐種	間伐強度	平均樹高成長量		
		$0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$	$0.5\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$	$0.7\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$
下層間伐	10%	10yr<	3 yr	2 yr
	20%	10yr<	6 yr	3.5yr
	40%	10yr<	10 yr<	7 yr
	60%	10yr<	10 yr<	10 yr<
上層間伐	10%	10yr<	4 yr	2.5yr
	20%	10yr<	7 yr	4 yr
	40%	10yr<	10 yr<	7.5yr
	60%	10yr<	10 yr<	10 yr<
全層間伐	10%	10yr<	2.5yr	2 yr
	20%	10yr<	4.5yr	3 yr
	40%	10yr<	10 yr<	7 yr
	60%	10yr<	10 yr<	10 yr<

間伐間隔は5年前後となった。

間伐間隔を5年以下で行うのは作業量の点から、強度の間伐を行うのはそのために生じる気象害等の弊害⁽⁴⁸⁾から現実的ではない。複層林施業で実行可能な間伐間隔を5年間以上であると考えたと林分の平均樹高成長量が $0.5\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ 以上の林分では実行困難で、平均樹高成長量が $0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ 以下の林分で行うことが望ましい。河原⁽³⁵⁾は、間伐後の相対照度の変化をもとに、平均樹高成長量が $0.2\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ 以下の森林で複層林施業をおこなうことが望ましいと述べている。

7.2.2 残存木の成長促進を目的として間伐する場合

間伐後の残存木の成長促進を目的に間伐を行う場合、間伐後に生じた林冠の孔が回復していない段階では、どの個体の樹冠からも占有されていない空間があり個体の葉重量が増加する余地が残されているので、間伐の必要性は小さいと考える。一方、林冠が閉鎖した段階では、間伐後に生じた林冠の孔は残存木にすでに配分されており葉重量が増加する余地はない。この段階で生産される個体の幹材積成長量で不十分であれば、間伐が必要である。このような理由から、林冠が閉鎖した段階で間伐の必要性を検討すればよいと考えて、林冠がほぼ閉鎖するまでの期間を間伐の間隔の目安とした。

林冠孔隙率が3%のとき林冠がほぼ閉鎖していると考えて、図-53から林冠孔隙率が3%になるまでの期間を求めた(表-13)。平均樹高成長量が $0.3\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ のとき、あるいは材積間伐率が60%以上の時には林冠が閉鎖するまで10年以上かかる。一方平均樹高成長量が $0.7\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ のとき材積間伐率が20%以下では間伐後5年目以内で林冠がほぼ閉鎖した。通常、残存個体の成長促進のための間伐では材積間

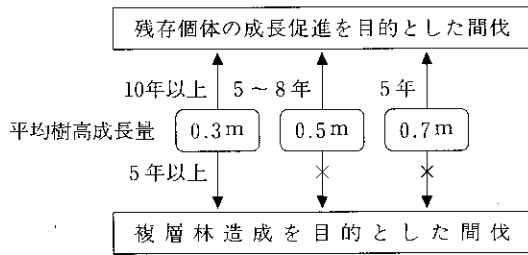


図-66 平均樹高成長量別の間伐間隔
×印は複層林の造成が困難であることを示す。

伐率が30%以下である場合が多い⁽⁴¹⁾。したがって、この場合には平均樹高成長量が0.3, 0.5, 0.7m・yr⁻¹で10年以上, 5~8年, 5年で間伐の要否を判断する必要があると考えた。

7.2.3 ま と め

平均樹高成長量と間伐間隔の関係を模式図(図-66)に示した。平均樹高成長量が0.5, 0.7m・yr⁻¹の場合、複層林造成には不向きで残存個体の成長促進を目的とした育林作業を行うべきであるが、この場合も5~8年間隔, 5年間隔で間伐の実施を検討する必要がある。一方、平均樹高成長量が0.3m・yr⁻¹の場合には複層林造成が可能であり、残存個体の成長を目的とした間伐の場合の間伐間隔は10年以上であり、頻繁に間伐をしなくてもよい。

7.3 間伐強度

7.3.1 複層林施業を目的として間伐する場合

大まかに言えば、林床の相対光量子束密度と林冠孔隙率はほぼ等しく(図-62)、間伐直後の林冠孔隙率の増加量と材積間伐率もほぼ等しいと言えた(図-35, 52)。したがって複層林造成を目的とする場合、間伐直後の目標とする相対光量子束密度と現在の相対光量子束密度の差を材積間伐率の大まかな目安にすれば良いことになる。間伐後の林冠孔隙率の減少速度λは材積間伐率が大きいほど小さいが、複層林の造成が可能であるとした平均樹高成長量が0.3m・yr⁻¹の林ではλ = 0.1yr⁻¹前後で材積間伐率の影響は小さかった。

これらの結果から、平均樹高成長量が0.3m・yr⁻¹以下の林分における複層林造成のための標準的な間伐スケジュールを考えた。林床の相対照度を20%以上で維持するためには、林冠が閉鎖した状態で40%の材積間伐率で間伐を行い、その後7年おきに20%の間伐を繰り返せばよい。相対照度を10%以上で維持するためには、林冠が閉鎖した状態で30%の材積間伐率で間伐を行い、その後10年おきに20%の間伐を繰り返せばよい。

7.3.2 残存木の成長促進を目的として間伐する場合

間伐強度が大きいほど個体葉重量の変化量や材積のR.G.R.は大きい(図-57, 60)、一方で林分の材積成長量は低下した(図-58)。これらの間伐強度による影響の程度は平均樹高成長量によって異なった。残存木の成長を促進させるための間伐では林分材積成長量を大きく低下させずに、個体材積の成長を促進させる必要がある。ここで、仮に間伐後5年間の林分材積成長量の許される低下率を無間伐の30%以内に設定してみよう。平均樹高成長量が0.5m・yr⁻¹

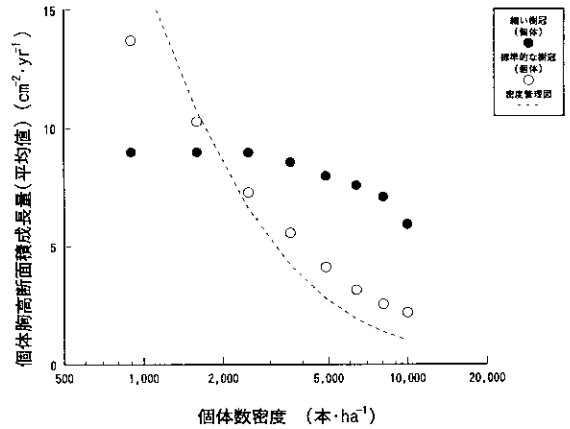


図-67 個体数密度と胸高断面積成長量の関係

以上であれば材積間伐率が40%の間伐は実行可能であるが、平均樹高成長量0.5m・yr⁻¹未満の場合では材積間伐率は40%以下である必要がある。また、樹高成長量が0.5m・yr⁻¹未満の場合、材積間伐率が40%以上では林冠の回復が遅い(図-53)。通常残存木の成長を促進するための間伐において材積間伐率は30%以下である場合が多く⁽⁴¹⁾、一般には林分材積成長量を大きく低下させるような間伐や林冠が長期間回復しないような間伐はおこなわれていない。

一方、材積間伐率が10%未満の場合、材積のR.G.R.に及ぼす影響は小さかった(図-60)。そこで、残存個体の成長を促進する目的で間伐を行う場合、樹高成長量が0.5m・yr⁻¹未満では10~30%、0.5m・yr⁻¹以上では10~40%の材積間伐率が間伐強度の目安となるであろう。

従来、本数密度は間伐強度を設定する場合の目安とされており密度管理図が一般に用いられている。こうした本数密度の管理は長期的な森林管理スケジュールを考える場合に有効である。本論文では間伐後の林冠修復過程を対象としたため林分密度に関して検討しなかったが、林冠動態モデルを用いても密度管理方法を検討できる。著者は本モデルを応用して、35年生前後の標準的な樹冠形状のヒノキで構成されるヒノキ林と樹冠が細いヒノキが分布する地域のヒノキ林の密度管理方法について検討した結果を報告し、樹冠が細い場合には通常の密度管理とは著しく異なる密度管理方法が求められることを示した⁽⁶³⁾。

標準的な樹冠形のヒノキは900~10000本・ha⁻¹の範囲では個体数密度が小さいほど個体の平均胸高断面積成長量は大きく(図-67)、当地域のヒノキの密度管理図⁽⁶⁹⁾で求めた個体数密度と個体ごとの胸高断面積成長量の関係とほぼ一致した。これに対して樹冠の細いヒノキの場合、3000~5000本・ha⁻¹以下で平均胸高断面積成長量はほぼ一定であり、通常より高密度で密度管理する必要がある。現実的には岡山県では通常3000~4000本・ha⁻¹の植栽密度で植栽する場合が多いので、樹冠が細いヒノキが分布する地域では35年前後までは間伐は行わなくても良いであろうと考えた。一方、標準的な樹冠形状のヒノキの場合、密度管理図による本数密度管理は有効であろう。このように、本モデルは密度管理方法を検討する場合についても応用できる。

残存木の成長を促進するための間伐の場合、間伐強度はこのような密度管理による目標と樹高成長量別の間伐強度の範囲と検討しながら決定する必要があると考えた。

おわりに

以上のように、林冠動態モデルを用いることによって、間伐方法を評価し、間伐の目的別の具体的な間伐指針を示すことができた。

林冠動態モデルは間伐方法のみならず他の育林作業に対しても重要な情報を提供しうると考える。例えば、本モデルで生枝下高を任意に設定することによって枝打ちの影響について把握できると考える。また若齢時の樹冠形状や着葉分布を知ることによって、樹冠閉鎖までの期間と植栽密度の関係が明らかになれば、下刈りを含めた幼齢林分の育林方法についても本モデルを適用できると考える。今後、このようなモデルを利用した総合的な育林システムの検討を行う必要があると考える。

上記のように、本モデルを人工林施業に応用する局面は少なくないと考える。本論文ではモデルの適用範囲をスギ、ヒノキ人工林にとどめたが、モデルの一部を改変して広葉樹天然林に適用できれば天然林管理方法を考える上で重要な情報を得ることが出来ると考える。著者⁽⁶⁴⁾は天然林の林冠木が全て倒伏したと仮定してホオノキの個体数変化についてシミュレーションを行い、林冠に大きな攪乱が繰り返して生じることがホオノキの群落形成には必要であることを指摘した。このように天然林の更新を考える場合、林冠の攪乱は重要な意味を持つ。林冠動態モデルによって天然林の林冠状態を予測した後、モデルによる間伐実験による間伐と同じ方法で自然攪乱をコンピュータ上で発生させ、林内の任意の個体を取り除いた後の林冠の動態を予測することで、攪乱の大きさや分布と更新樹の種組成の関係を把握できる。天然林の維持管理方法の確立は今日的課題であるが、この課題に林冠動態モデルを適用する意味は大きいと考えられる。このため天然林に適用可能な林冠動態モデルを構築する必要があると考える。

また、本モデルに光合成速度など生理生態学的研究成果を組み込むことが出来れば、生理生態学的研究から森林施業技術への提言をより具体的に行うことができる。その意味で、本モデルは生理生態研究と森林施業研究のインターフェイス的役割を期待できる。

謝 辞

本論文の基となるアイデアは、私が林業改良指導員として奥津林業改良指導員駐在所に勤務中に、地域の林業研究グループのメンバー(森林経営者の方々で構成されている)と間伐選木作業を行った際の議論中に生まれた。立木の本数密度による間伐率よりも、樹冠の状態や間伐後の林冠の孔の状態のイメージを大切に選木作業に強い共感を覚えたことは本研究のバックボーンとなっている。当時の林業研究グループのメンバーに感謝する次第である。

本論文は岡山県林業試験場の単県試験研究課題、「枝打ちと間伐の程度が肥大成長に及ぼす影響に関する試験」、「ヒ

ノキ林育成技術のシミュレーション化」、「二段林造成のための林内照度予測技術の開発」で実施した研究に基づくものである。これらの研究課題の実施にあたり、岡山県林業試験場の職員の方々のご協力をいただいた。また同場の作業員の方々には煩雑な野外調査を手伝っていただいた。

調査地の選定に当たり、岡山県林業公社、奈義町森林組合、中央町役場、加茂町役場、津山市役所および津山地方振興局、勝英地方振興局の森林課のご協力を得た。

この研究を進めるにあたり、京都府立大学農学部の高原幹弘教授にお励ましとご指導を頂き、貴重なデータの使用を許可していただいた。京都大学農学部の大島誠一博士、森林総合研究所の千葉幸弘博士、倉地奈保子博士にはご助言を頂いた。また、本論文のうち、林床の光環境の予測に関するアイデアは石川県林業試験場の矢田豊氏とのディスカッションの中から生まれた。

また、本論文をとりまとめるにあたって、岐阜大学の林教授、信州大学の新田隆三教授、静岡大学農学部の小嶋睦雄教授、今永正明教授にご助言とご意見を頂いた。

静岡大学の角張嘉孝教授には本研究の実施と本論文の作成にあたり、終始暖かいお励ましとご指導を賜わった。

これらの方々には心よりお礼を申し上げる。

引用文献

- (1) 阿部信行 (1982) トドマツ人工林における個体間競争の推移。日林北支論 31, 206~208.
- (2) 阿部信行 (1991) トドマツ人工林の間伐方法別収穫予想。森林計画学会誌 16, 87~97.
- (3) 相場芳憲 (1977) スギ人工林の生長におよぼす保育の影響 (VI) H-D- ρ -V diagram による林分生長の予測。日林誌 59, 273~286.
- (4) 安藤 貴 (1968) 同齡単純林の密度管理に関する生態学的研究。林試研報 210, 1~153.
- (5) 安藤 貴 (1984) 優勢木の間伐—量的・質的成長と健全性に及ぼす影響。林業技術 503(2), 11~15.
- (6) 安藤 貴・宮本倫仁・桜井尚武・竹内郁雄・谷本丈夫 (1983) 二段林の光環境の経年変化。林試研報 323, 65~73.
- (7) 安藤 貴・宮本倫仁・竹内郁雄・桜井尚武・谷本丈夫 (1983) 林内の光環境と下木の樹高生長。林試研報 323, 108~110.
- (8) 安藤 貴・蜂屋欣二・土井恭次・片岡寛純・加藤善忠・坂口勝美 (1967) スギの保育形式に関する研究。林試研報 209, 1~76.
- (9) Chiba, Y., Fujimori, T., and Kiyono, Y., (1988) Another interpretation of the profile diagram and its availability with consideration of the growth process of forest trees. J. Jpn. For. Soc. 70, 245~254.
- (10) 藤島信太郎 (1956) 実践造林学講義。pp. 237~259, 養賢堂, 東京.
- (11) 蜂屋欣二 (1982) 間伐の仕方・出し方。林業普及双書 81, pp. 8~50, 全国林業改良普及協会, 東京.
- (12) 原田 洗・佐藤久夫・堀田 庸・只木良也 (1969) 28年生スギ林およびヒノキ林の養分含有量。日林誌 51, 125~133.
- (13) 橋本良二 (1986) スギ人工林の間伐と光環境 (III) 種々の間伐による林分構造と平均葉面照度の変化。日林誌 68, 261~270.
- (14) Hashimoto, R. (1991) Canopy development in young sugi (*Cryptomeria japonica*) stands in relation to changes with age in crown morphology and structure. Tree Physiol. 8, 129~143.
- (15) Hashimoto, R. (1993) Photosynthetic responses to light intensity for saplings of some tree species growing in the shaded undergrowth of a *Quercus serrata* Forest. Environ. Control in Biol. 31(3), 139~146.
- (16) 平野 暁 (1971) カンキツ樹の葉量とその分布 (第7報) 葉の空間分布の簡易測定法。園芸学会研究発表要旨昭和46年度春,

- 34~35.
- (17) 広岡広之・山田行雄 (1989) シミュレーションモデルの評価. システム農学 5, 55~64.
- (18) 池本 隆 (1986) スギの各種林分構造下における林内相対照度の経年変化及び下木の生長ならびに相対照度の間接的測定法. 鳥取県林試研報 29, 14~44.
- (19) 猪瀬光男 (1978) トドマツの単木成長モデル—樹冠形, 葉量および成長量の冠形一. 林試北支年報, 57~63.
- (20) 岩神正朗 (1983) ヒノキ幼齡林における周囲密度・樹冠形態と単木形質成長との関係についての予備的接近. 高知大演報 10, 77~85.
- (21) Jeffers, J. N. R. (1978) An introduction to system analysis with ecological application. Edward Arnold Press Ltd., London; 古在豊樹・高倉 直・仁科弘重 (訳) 生態学のためのシステム分析入門, 209 pp., 朝倉書店, 東京.
- (22) 可知直樹 (1991) 植物の生理生態と最適化モデル. 遺伝 45(8), 49~53.
- (23) 梶原幹弘 (1971) 樹木の成長量の測定, 森林計測学. 118~154, 養賢堂, 東京.
- (24) 梶原幹弘 (1975) スギ同齡林における樹冠の形態と量に関する研究 (I) 樹冠形. 日林誌 57, 425~431.
- (25) 梶原幹弘 (1976) スギ同齡林における樹冠の形態と量に関する研究 (II) 林分内での樹冠の形態. 日林誌 58, 97~103.
- (26) 梶原幹弘 (1976) スギ同齡林における樹冠の形態と量に関する研究 (III) 樹冠の形態の生育段階的变化. 日林誌 58, 313~320.
- (27) 梶原幹弘 (1980) スギ樹冠の構造ならびに樹冠量と葉生重量との関係. 京府大演報 24, 49~63.
- (28) 梶原幹弘 (1981) ヒノキ樹冠の形と構造および樹冠量と葉生重量との関係. 京府大演報 25, 11~28.
- (29) 梶原幹弘 (1982) スギ, ヒノキにおける樹冠量と幹材積成長量との関係. 京府大演報 26, 16~23.
- (30) 梶原幹弘 (1995) 大野演習林のスギ同齡林における16年間の幹と樹冠の測定結果. 京府大演報 39, 105~119.
- (31) 梶原幹弘・鶴飼一博 (1995) 大分のスギ同齡林における樹冠と幹の成長との関係(III) 成長モデルとその適合度. 京府大演報 39, 17~27.
- (32) Kakubari, Y. (1987) Modelling the productive structure and function of natural forests of *Fagus crenata* at different altitudes in Naeba Mountains. An analysis of dry matter production with an ecophysiological computer simulation model based on an individual tree. Bull. Tokyo Univ. For. 76, 107~162.
- (33) 上中作次郎・尾方信夫 (1983) ヒノキ林における相対照度の経年変化. 林試研報 323, 60~64.
- (34) 上中作次郎・尾方信夫・安藤 貴 (1983) ヒノキ林間伐後の林内の相対照度. 林試研報 323, 55~57.
- (35) 河原輝彦 (1988) 複層林誘導のための林内照度のコントロール. 森林立地 30(1), 10~13.
- (36) 河原輝彦・加茂皓一・山本久仁雄 (1985) 幼齡スギ林における利用間伐モデル試験. 日林誌 67, 28~32.
- (37) 川崎達郎 (1995) 上層間伐の得失—間伐後の成長を中心として—, 高知営林局業務研究発表集, 177~180.
- (38) Kikuzawa, K. (1981) Yield-density diagram for Todo-Fir plantations (I) A new Y-N curve based on the Beta-type distribution. J. Jpn. For. Soc. 63, 442~450.
- (39) 菊沢喜八郎 (1981) 間伐効果に関する定量的研究 (I) 収量—密度図を用いた分析. 日林誌 63, 51~59.
- (40) Kira, T., Ogawa, H., Hozumi, K., Koyama, H. and Yoda, K. (1956) Intraspecific competition among higher plants. V. Supplementary notes on the C-D effect. J.Inst.Polytech.Osaka City Univ. D7, 1~14.
- (41) 清野嘉之 (1990) ヒノキ人工林における下層植物群落の動態と制御に関する研究. 森林研報 359, 1~122.
- (42) 倉地奈保子 (1989) カラマツ樹冠内の現存量密度の水平分布. 100回日林論, 389~390.
- (43) Kurachi, N. Hagihara, A. and Hozumi, K. (1986) Distribution of leaf- and branch-biomass density within a crown of Japanese Larch and its relationship to primary production. Analysis by sainome-cutting. In Crown and canopy structure in relation to productivity (Fujimori, T. and Whitehead, D., eds.). 308~322, For. Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki.
- (44) 黒岩雄雄 (1979) 直射光下群落光合成. 植物生態学講座 3 群落の機能と生産 (岩城英夫編). 112~123, 朝倉書店, 東京.
- (45) Magnussen, S., Smith, V.G. and Yeatman, C.W. (1985) Foliage and canopy characteristics in relation to aboveground dry matter increment of seven jack pine provenances. Can. J. For. Res. 16, 464~470.
- (46) Maguire, D.A. (1983) Suppressed crown expansion and increased bud density after precommercial thinning in California Douglas-fir. Can. J. For. Res. 13, 1246~1248.
- (47) 真下育久 (1983) 林地の生産力に関する研究のあゆみ, 日本の森林土壌. 155~187, 農林水産省林野庁監修, 林業技術協会, 東京.
- (48) 松田正宏 (1988) スギ人工林の冠雪害発生機構に関する研究, 福井県総合グリーンセンター研究報告 8, 1~78.
- (49) 水永博己 (1992) 林冠動態モデルによる間伐効果予測 (I) 間伐後の林冠表面形状の動態. 日林誌 74, 314~324.
- (50) 水永博己 (1994) 林冠動態モデルによる間伐効果予測 (II) 着葉構造と材積成長量の予測と検証. 日林誌 76, 329~337.
- (51) 水永博己 (1995) 立木の配置状態から林内の光子束密度がわかるか?, 日林誌 77, 266~268.
- (52) 水永博己 (1995) 林冠動態モデルによる間伐効果予測 (III) 間伐ゲームによる間伐方法の特性評価. 日林誌 77, 373~377.
- (53) 水永博己 (1995) 吉永町南部地域のスギの樹冠構造と生産力. 岡山林試研報 12, 21~36.
- (54) Mizunaga, H. (1998) Effects of disturbances on large patch formation of *Magnolia obovata*, a deciduous broad-leaved tree. -field investigation and simulation.- Journal of Sustainable Forestry. 6, 251~266.
- (55) 水永博己・丹原哲夫 (1989) スギ精英樹の樹冠構造の遺伝変異. 日林関西支講 40, 222~225.
- (56) Morikawa, Y., (1971) Daily transpiration of a 14-year-old *Chamaecyparis obtusa* stand. J. Jpn. For. Soc. 53, 337~339.
- (57) 森田栄一 (1976) Simulationによる間伐後の林分生長の予測II, 87回日林論, 101.
- (58) 西村五月 (1987) 長崎県のスギ林と環境. 森林立地 29, 33~35.
- (59) 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.
- (60) 小川房人 (1980) 個体群の構造と機能, 植物生態学講座 5, 221 pp., 朝倉書店, 東京.
- (61) 岡山県農林部林政課 (1984) 岡山県民有林スギヒノキ人工林収穫予想表及び林分材積表. 126 pp., 岡山.
- (62) 岡山県林業試験場 (1980) 岡山県の林野土壌. 141 pp., 岡山.
- (63) Oker-Blom, P., Kaufmann, M.R. and Ryan, M.G. (1991) Performance of a canopy light interception model for conifer shoots, trees and stands. Tree Physiol. 9, 227~243.
- (64) 大橋慶三郎 (1992) 路網を生かした間伐林業のマネージメント. 24~62, 全国林業改良普及協会, 東京.
- (65) Oohata, S. and Shinozaki, K. (1979) A statistical model of plant form - Further analysis of the pipe model theory. Jpn. J. Ecol. 29, 323~335.
- (66) Osawa, A. (1990) Reconstructed development of stem production and foliage mass and its vertical distribution in Japanese larch. Tree Physiology. 7, 189~200.
- (67) Osawa, A., Ishizuka, M. and Kanazawa, Y. (1991) A profile theory of tree growth. For. Ecol. Manage. 41, 33~63.
- (68) Pulkkinen, P. (1991) Crown structure and partitioning of aboveground biomass before the competition phase in a mixed stand of normal crowned Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and pendulous Norway spruce (*Picea abies f. pendula* (Lawson) Sylven). Tree Physiology 8, 361~370.
- (69) 林野 庁 (1980) 近畿・中国地方国有林ヒノキ林分密度管理図, pp. 1~7.
- (70) Ruchaemi, A., Iwagami, S. and Sakamoto, T. (1982) The individual tree growth in competitive conditions. Bull. of Kochi Univ. Forests. 9, 53~89.
- (71) 斎藤秀樹・四手井綱英 (1973) スギ幼齡林の一次生産力とその推定法の検討. 日林誌 55, 52~62.
- (72) 坂口勝美 (1961) 間伐の本質に関する研究. 林試研報 131, 1~95.
- (73) 佐藤敬二 (1971) 林木保育, 生産価値向上の保育(間伐, 枝打ち), 新造林学 (佐藤敬二編). pp. 337~353, 地球社, 東京.

- (74) 佐藤大七郎 (1973) 陸上植物群落の物質生産 I a — 森林一, 生態学講座 5 a, pp. 1~95, 共立出版, 東京.
- (75) Satoo, T. (1979) Loss of canopy biomass due to thinning - A comparison of two young stands of *Cryptomeria japonica* of cutting and seedling origins. J. Jpn. For. Soc. 61, 83~87.
- (76) 佐藤大七郎・扇田正二 (1958) 林分生長論資料 4, わかいヒノキの人工林における葉の量と生長量, 東大演報 54, 71~100.
- (77) 佐藤大七郎・扇田正二 (1966) 林分生長論資料 6, わかいスギ林における物質の現存量, 生産量および葉の量と生長の関係, 東大演報 62, 117~146.
- (78) Sato, T. and Imoto, H. (1979) Modelling crown canopy of an even-aged stand of *Cryptomeria japonica* from measurement leaf mass. A new approach to the morphology of forest crown. J. Jpn. For. Soc. 61, 127~134.
- (79) Seitz, R. (1986) Crown development of *Araucaria angustifolia* in its natural environment during 60 years. In Crown and canopy structure in relation to productivity (Fujimori, T. and Whitehead, D., eds.). 129~145, For. Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki.
- (80) 清水 晃・竹下敬司・西沢正久 (1984) 森林の水土保全機能に関する森林構造学的研究, 九大演報 54, 1~84.
- (81) 森林林業行政研究会編 (1991) 森林林業早わかりデータ — 森林林業木材産業の基本指標一, 地球社, 東京, 137.
- (82) Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. and Kira, T. (1964) A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory I. Basic analysis. Jpn. J. Ecol. 14, 97~105.
- (83) Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. and Kira, T. (1964) A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. Jpn. J. Ecol. 14, 133~139.
- (84) 白川 正 (1988) シダレヒノキについて, 林木の育種 149, 20~21.
- (85) Tadaki, Y. (1986) Productivity of forest in Japan. In Crown and canopy structure in relation to productivity (Fujimori, T. and Whitehead, D., eds.). 7~25, For. Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki.
- (86) 只木良也・尾形信夫・長友安男・吉田武彦 (1966) 森林の生産構造に関する研究 X 無間伐の45年生ヒノキ林の生産力, 日林誌 48, 387~393.
- (87) 只木良也・四手井綱英 (1963) 数量的間伐に関する生態学的研究, 京大演報 34, 1~31.
- (88) 高田和彦・小林正吾 (1983) 最終回の間伐以後のスギ林分における直径および断面積生長量と競争因子の関係, 日林誌 65, 113~118.
- (89) 玉井重信・大久保泰志・堤 利夫 (1983) 小径木間伐に関する研究 (VI) 間伐後12年間のスギ林の林況および現存量の変化について, 日林誌 65, 372~381.
- (90) Tanaka, K. (1988) A stochastic model of height growth in even-aged pure forest stand - Why is the coefficient of variation of height distribution smaller than that of the diameter distribution? J. Jpn. For. Soc. 70, 20~29.
- (91) 田中 格・松本陽介・重永英年・上村 章 (1994) 複層林下木ヒノキの当年生葉における比葉面積, 光合成能力, およびクロロフィル ab 比, 森林立地 36(2), 22~31.
- (92) 寺崎 渡 (1905) 落葉松ノ間伐, 林試研報 2, 97~176.
- (93) 堤 利夫 (1978) 樹木 — 形態と機能一, 270 pp., 文永堂, 東京.
- (94) 早稲田収 (1983) 林内光環境とスギ稚樹の生長, 林試研報 323, 105~107.
- (95) Washitani, I. and Tang, Y. (1991) Microsite variation in light availability and seedling growth of *Quercus serrata* in temperate pine forest. Ecol. Res. 6, 305~316.
- (96) 矢幡 久 (1991) 天空写真による林内光環境の推定に関する研究 — 雲のある日における散光成分の推定 —, 日林九支研論集 44, 111~112.
- (97) 矢幡 久 (1993) 熱帯降雨林内の写真推定した光環境とフタバガキ科苗木の成長に及ぼす影響, 森林立地 35(2), 10~19.
- (98) 山本博一 (1991) 相対化の手法によるシステム収穫表の作成, 森林計画学会誌 16, 51~70.
- (99) 山本久仁雄 (1980) 非皆伐施業に関する研究 (IV) ヒノキ林内に樹下植栽したヒノキの生長, 日林関西支講 31, 127~129.
- (100) 依田恭二 (1971) 森林内での光の垂直分布, 森林の生態学, pp. 56~68, 築地書館, 東京.