

人工二段林における林分構造の解析および 距離従属型下木成長モデルの作成

笹川 裕史*・箕輪 光博*・白石 則彦*
鈴木 誠**・村川 功雄**・里見 重成**

An Analysis of Stand Structure of Understory Trees of a Double-Storeyed Plantation and Development a Distance-Dependent Growth Model for a Double-Storeyed Plantation

Hiroshi SASAKAWA*, Mitsuhiro MINOWA*, Norihiko SHIRAISHI*, Makoto SUZUKI**,
Isao MURAKAWA** and Shigenari SATOMI**

はじめに

国民の森林に対する要求が変化する中で、複層林施業は木材生産だけでなく、国土保全、水源涵養、保健休養などの機能を高度に発揮するといわれ、これからの林業の一形態として注目されている。しかし、複層林の林分構造は多様で、特に、下木は上木や下木どうしの影響を強く受け、成長過程が複雑であること、複層林施業が促進されてから日が浅いことから、一斉林と比べて複層林の成長は十分に把握されていない。

ここで、複層林と複層林施業の定義であるが、従来、様々な定義が見られるなか、藤森(1992)は複層林を、二層以上の木本の階層を有する森林、と広義に定義している。一方、林野庁は複層林を皆伐新植による一斉林に対するアンチテーゼとして、「複層林施業とは、原則として人工更新により造成され、一斉林型を呈している森林において、森林を構成する林木を部分的に伐採し、人工更新により林冠層が二個以上(施業の関係上一時的に単層となるものを含む)である複層林型の森林を造成する施業である。」と定義している。この定義に従うと、複層林化される森林は上木(上層木)、下木(下層木)とも人工植栽に限ることになり、天然林施業などは複層林施業には含まれないことになる。なお、本研究の目的である林分構造の解析が人工二段林を対象としていること、調査地として人工更新を行った二段林を取り扱った、等の理由から本研究では複層林は林野庁による狭義的な定義に従うこととする。

林分構造に関する研究は、中村ら(1993)の長野県木曾地域のヒノキ-ヒノキ複層林、安藤ら(1983)の愛媛県久万地域のスギ-ヒノキ複層林、家原(1988)の奈良県地獄谷地域のアカマツ-ヒノキ・スギ複層林の研究報告などがある。複層林の研究をする際には上木および下木樹種によって、また、地域によって成長量が大きく変化してしまい、成長モデルを作成する際パラメータの決定が困難になってしまう。一方、複層林下木の成長を把握する際には林内の光環境の把握が必

* 東京大学大学院農学生命科学研究科森林科学専攻

Department of Forest Science, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

** 東京大学農学部附属演習林千葉演習林

University Forest in Chiba, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo.

要であり、林内の光環境に関する研究は早稻田(1983)、河原(1988)らによって行われている。光環境を他の変数もしくはパラメータに置き換えた複層林の成長モデルは龍原(1995)、山本(1993)、松本(1995)、河原(1983)らによって複層林独特の多層(二段)にわたる林分構造を表現するために上木と下木を一つの林分と見なした、林分レベルのモデルの開発が行われているが、より正確な単木レベルの予測を可能にする距離従属型のモデルは存在しない。また、距離従属型成長モデルに関する研究は、小林(1975, 1976, 1978)のモデル、高田(1961)の受光角モデル、NEWHAM(1964)の交差角モデルなどがあるが、複層林に関するものは存在しない。

以上のことより、本研究の目的は複層林の林分構造を把握するため、千葉演習林における鈴木ら(1990)の設定した試験区を利用した人工二段林における林分構造の解析を行い、次いで距離従属型下木成長モデルの作成を行うものとした。

なお本研究の一部は笹川ら(1998)によって報告されている。

資 料

解析には東京大学千葉演習林の柚の木3林班C₂-3小班にあるスギ二段林試験区の資料を用いた(鈴木ら, 1990)。この試験区は同一林分で間伐率を変えることにより、上木密度が異なる林分をつくり、これらの林分内に樹下植栽を試みたもので、上木の密度がha当たり150本、100本、50本の区画と皆伐区(以降、150本区、100本区、50本区、皆伐区と記す)の4区画となっている。試験区は斜面方位が東で、斜面下部が10~15°の緩やかな斜面と中腹から尾根にかけて30~35°の急斜地である。斜面の下部に150本区と100本区が配置され、斜面の上部に50本区と皆伐区が配置されている。試験区の二段林上木は1909年に植栽された。過去の伐採状況は、まず1936年(27生時)に千葉演習林全域に生じた雨水被害のため被害木の間伐が行われた。さらに1948年(39年生時)に利用間伐(材積間伐率16%)が行われている。そして1966年に現在の4区画が設定されている。下木は1967年に植栽された。その後は1977年と1985年に除伐を行っている。

本研究ではまず、1989年に設定した8カ所のプロット(20m×20m)について1997年に樹高、胸高直径、樹冠径の毎木調査を行い、上木については枝下高も測定した。次に、各区画に2カ所ずつあるプロットから、樹幹解析を行うための試料木を伐採するプロットを1カ所選んだ。各伐採予定プロットにおいて、下木を各胸高直径階から1本ずつ、合計10本を選出し、4プロットで40本を伐採した。伐採した林木は0m, 0.3m, 1.3m, それ以上は2mごとに円板を採取し、5年ごとに年輪を読みとった。

方 法

1. 林分構造の解析

ここではまず、平均値として見た場合の複層林がどのような状態にあるかを確認するため、上木密度の異なった各試験区の特値の比較を行った。特値として上木と下木について伐採を行ったプロットごとに本数密度、平均胸高直径、平均樹高、胸高断面積合計、材積合計、相対幹距を求めた。また、複層林の生産性を考えるためにプロットごとの上木と下木の胸高断面積の合計と材積の合計を求めた。ここで、相対幹距(relative spacing, S_r)とは、平均樹高に対する平均幹距($100/\sqrt{N}$)の割合を表したもので、

$$Sr = \frac{100^2}{H\sqrt{N}} (\%)$$

ただし, Sr : 相対幹距

H : 平均樹高 (m)

N : 本数密度 (本/ha)

と表される。すなわち、相対幹距は、本数と樹高を同時に考慮した林分密度の尺度で、大きくなるほど疎な林分であるといえる (南雲・箕輪, 1990)。また、材積合計は立木幹材積表 (1970) により計算した。次に、樹幹解析の結果から、各区画の下木の成長過程の比較を行った。比較する成長量は、直径と樹高に関する経年の総成長量、定期平均成長量、総平均成長量である。ただし、定期平均成長量とは、ある m 年間の平均成長量であるが、本研究では定期平均成長量を連年成長量と呼ぶ。

2. 距離従属型下木成長モデルの作成

2.1 成長モデルの検討

成長モデルは、距離従属型単木モデル、距離独立型単木モデル、距離独立型林分モデルの三つの基本形に分類されている (木梨, 1978)。距離従属型単木モデルとは単木間の距離を考慮に入れた場合のモデル (distance-dependent individual growth model) で、このモデルの背後には、ある木の競争の量はその木の競争圏と隣接木の競争圏との重なり具合に比例しているという基本仮定がある。このモデルの難点としては単木成長の生理的・生態的メカニズム (光合成速度と環境因子との関係など) に対する知識を必要とすること、また立木位置図の作成やデータの記憶、計算に多大の労力と時間を要することが挙げられる。また、その結果は“樹木の成長に最も関係のある因子はそのもの自身の大きさである”という状態を含み、距離独立単木モデルで表現し得るともいわれている (TAKATA, 1979)。その反面、このモデルは樹冠の拡張を通じて樹木間の競争を考慮しているので、間伐による占有面積の変化やその残存木の成長に対する効果を定量的に明らかにし得て、より正確な成長予測を行える可能性を有している。

次に、二段林に対する距離従属型単木モデルの有効性を検討する。まず、複層林下木のおかれている環境を考えると、複層林内において下木は常時上木の庇陰下にある。また、下木の成長は上木、周囲の下木に影響された林内の光環境に大きく左右される。したがって、下木の成長を捉えるには、上木と周囲の下木の状態に応じた林内光環境を的確に把握する必要があるといえる。距離従属型単木モデルは競争状態を表現するための尺度 (競争尺度) に平面的な競争を表現するものと、縦方向の競争を表現するものがあり、それらを組み合わせることにより、単木の樹木がさらされている空間的な競争状態が表現される。このことはあえて上木や下木の影響ということを区別しなくても、ある林木に対する周辺木の影響を一つの尺度のなかに含ませることができる可能性を意味する。これを仮定するなら、成長モデルを作成する際、データを統一の観点で扱えるので、データの取り扱いが簡便になる。また、本研究で使用した調査地の下木は林齢 30 年になっており、林内の光環境の直接的な把握 (相対照度など) は困難なため、林木に対する光環境の影響も含む、競争尺度の使用は有効であると考えられる。

以下に本研究で使用した競争尺度を記す。

① APA (図-1)

周囲密度に関する研究は、過去、一斉林において多くなされている。APAはそのうちのひとつで、Brown (1965)の利用可能面積法 (area potentially available) のことである。APAとは対象木と周囲木とを結んだ線を2等分、もしくは特性値の比によって分割する垂線で囲まれた面積である。

② 投影樹冠占有面積

対象木の樹冠を投影したとき周囲木の投影樹冠よりも高い位置の面積のことである。樹木の光の捉え方はいろいろと研究されているが、この尺度は投影樹冠の情報があれば求めることができるので簡便である。

③ 投影樹冠面積

対象木の樹冠を投影した面積。投影樹冠占有面積とは異なり、周囲木の投影樹冠と重なった面積も含む。

④ 競争指数

競争指数とは、対象木の投影樹冠と周囲木の投影樹冠が重なった交点と対象木の中心を結んだ線で挟まれた角度の和を360で割ったものである。NEWHAM (1964)は疎開地では競争指数は0、樹木が枯死すると考えられる場合は1またはそれ以上の値をとるとしている。NEWHAMは投影樹冠の重なりを定義していないので、本研究では対象木の樹冠よりも低い周囲木の樹冠は計算に含めなかった。

⑤ 受光角

受光角とは、対象木の梢端と天頂を結ぶ線と対象木の梢端と周囲の梢端を結んだ線に挟まれた角度の平均である。高田 (1992)は樹木の成長量は受光角と直線関係にあり、受光角が一定値以下になると枯死すると仮定している。本研究では、傾斜を考慮して、計算する際、樹高+z (ここでzとはプロット周囲に設置した杭のうちのある1本の座標(x, y, z)をそれぞれ(0, 0, 0)とした際の個々の樹木のz座標)をもって対象木の梢端とした。高田は周囲木の定義をしていないので、本研究では上木の影響を反映させるために最も近い上木およびその上木までの距離に含まれるすべての樹木を周囲木とした。

⑥ 最近接上木距離

最も近い上木までの距離。

以上の競争尺度は、簡便に得られるか、樹冠の競争を表現できるか、という基準で選んだ。樹冠の競争を重視したのは、複層林においては下木の成長は光環境に大きく影響され、光を捉えるのは樹冠であるからと考えられるからである。

2.2 距離従属型下木成長モデルの作成

成長モデルの作成の流れは、まず、以上の競争尺度を下木の直径と樹高の連年成長量と比較し、連年成長量と競争尺度の関係を解析する。ここで、連年成長量を比較の対象とするのは、競争尺度は現時点のデータから得られるので、過去の状況の積み重ねである総成長量や総平均成長量では説明することができないと考えられるからである。次に、競争尺度に関する直径と樹高の違いについて解析する。最後に競争尺度から直接、下木の連年成長量を推定できるようにするため、連年成長量を目的変数、競争尺度を説明変数として、重回帰分析を行う。成長モデルは、まず、対象木の過去のデータから、成長曲線を推定し、林分を現状のまま保った場合の連年成長量を予測する。成長曲線は、林木の平均直径や平均樹高の成長曲線としてよく用いられているミッ

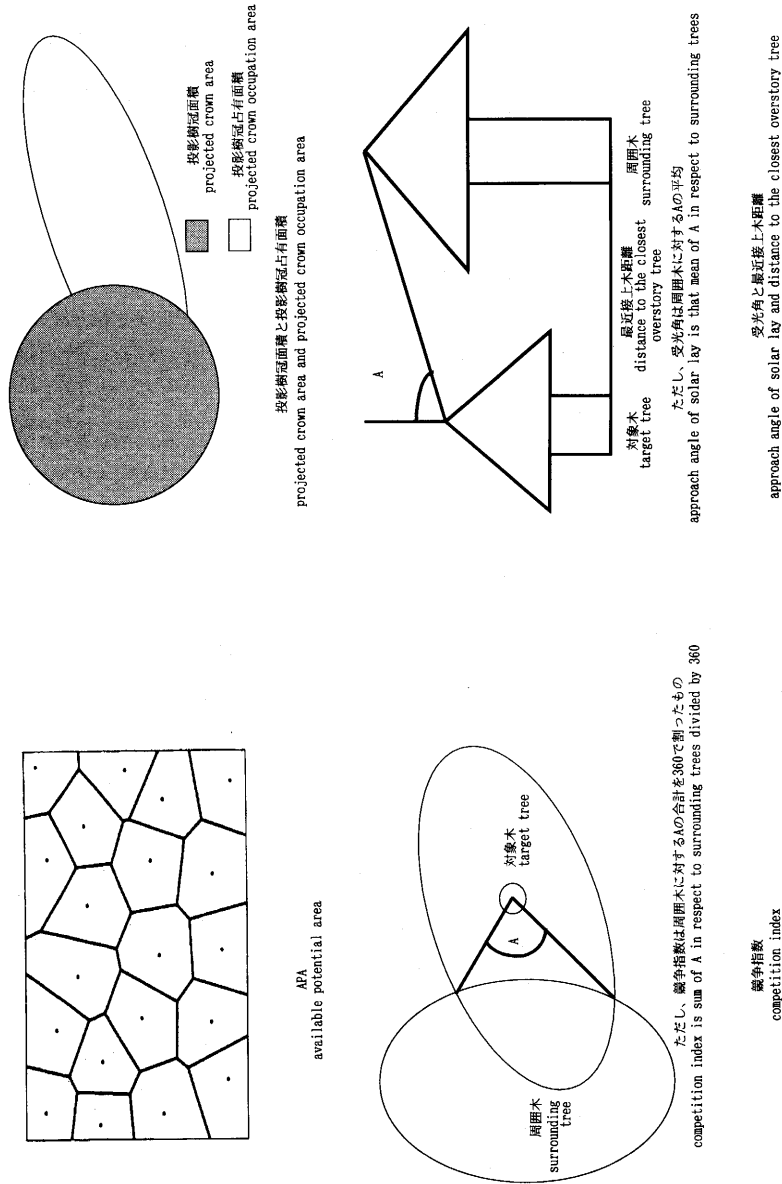


図-1 競争尺度

Fig. 1. Competition indicators.

チャーリッヒ曲線とした。ミッチャーリッヒ曲線は以下のように表される。

$$w = A(1 - Be^{-kt})$$

ただし, w : 総成長量

A, B, k : 定数

t : 林齢

次に、連年成長量に修正係数をかけたものを予測年まで積算し、予測年の総成長量を求める。ここで、修正係数とは、競争尺度から得られた連年成長量を、成長曲線から得られた当年の連年成長量で割ったものである。修正係数は以下のように表される。

$$Za = w_{t+1} - w_t$$

$$C = \frac{Z'a}{Za}$$

ただし, w_t : ミッチャーリッヒ曲線から推定された林齢 t 年の総成長量

w_{t+1} : ミッチャーリッヒ曲線から推定された林齢 $(t+1)$ 年の総成長量

Za : ミッチャーリッヒ曲線から推定された連年成長量

$Z'a$: 競争尺度から推定された連年成長量

C : 修正係数

修正係数は時間的変化とともに空間情報を成長モデルに含ませるという意味をもつ。ただし、修正係数は当年の値において計算し、変化することはない。この成長モデルは、成長曲線をもとにすることで、林齢の増加による成長量の減少を表現することができる。また、成長曲線から得られた連年成長量に修正係数をかけることで、間伐対象が上木、下木にかかわらず、林分の状況が変化した際の下木の成長量を予測することができる。

結果および考察

1. 林分構造の解析

二段林区と皆伐区の差、上木密度の違う二段林区の差に注目しつつ、林分特性値の比較と樹幹解析の結果の比較を行った。

1.1 林分特性値による比較

二段林試験区の林分特性値は表-1 のようになった。まず、胸高直径、樹高について比較する。

上木平均胸高直径、上木平均樹高は上木本数密度の低いプロットほど大きくなっている。これは上木林齢 57 年のとき、それぞれの上木本数密度を残して試験区を設定した後に成長量の差が生じたことも一因と考えられるが、同時に、残存本数が少ないほどより優勢な個体が残された影響も含まれていると考えられる。

本研究の場合、上木本数密度に差があることが重要である。また、本数密度が低くなるほど平均胸高直径が大きくなるという一般的な傾向と同じであるということから、試験区内の上木が特殊な状態でないと考えられ、今後、下木について考察していく上でよい条件といえよう。

下木平均胸高直径は上木本数密度の低いプロットほど大きくなっていることが注目される。この結果は、一般的にいわれるように、上木本数密度が林内の光環境を左右し、下木の直径成長に大きい影響を及ぼしていることを示している。また、一斉林においては本数密度が低いほど、直径の成長は大きくなるといわれているが、本結果では、皆伐区を除いて、下木本数密度が低いほ

表-1 二段林試験区林分特性値

Table 1. Stand characteristics of the double-storied experimental plot

| 上木 overstory trees | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------|
| プロット plot | 本数密度 tree density | 平均直径 mean dbh | 平均樹高 mean height | 断面積合計 total basal area of dbh | 材積合計 total volume | 相対幹距 relative spacing |
| | 本/ha trees/ha | cm | m | m ² /ha | m ³ /ha | % |
| 50 | 50 | 56.6 | 25.6 | 12.6 | 124.9 | 55.2 |
| 100 | 75 | 54.9 | 23.1 | 17.9 | 161.6 | 49.9 |
| 150 | 150 | 54.6 | 22.3 | 35.9 | 312.0 | 36.6 |

| 下木 understory trees | | | | | | |
|------------------------|----------------------|------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------|
| プロット plot | 本数密度 tree density | 平均直径 mean dbh | 平均樹高 mean height | 断面積合計 total basal area of dbh | 材積合計 total volume | 相対幹距 relative spacing |
| | 本/ha trees/ha | cm | m | m ² /ha | m ³ /ha | % |
| 0 | 1125 | 24.5 | 19.3 | 54.7 | 507.7 | 15.5 |
| 50 | 1550 | 20.2 | 15.0 | 53.2 | 409.7 | 16.9 |
| 100 | 1375 | 17.1 | 14.2 | 34.3 | 269.2 | 19.0 |
| 150 | 1175 | 15.9 | 14.9 | 24.6 | 200.3 | 19.5 |

| 上木および下木 overstory trees and understory trees | | |
|---|----------------------------------|----------------------|
| プロット plot | 断面積合計 total basal area of dbh | 材積合計 total volume |
| | m ² /ha | m ³ /ha |
| 0 | 54.7 | 507.7 |
| 50 | 65.8 | 534.6 |
| 100 | 52.2 | 430.8 |
| 150 | 60.5 | 512.3 |

ど下木平均胸高直径も小さくなっている。このことは、二段林の場合、上木本数密度が下木本数密度よりも下木の直径成長に強い影響を与えていることを示している。

一方、下木平均樹高は皆伐区が特に大きく、二段林区にはあまり差がない。すなわち、各区画の位置、斜面傾斜の影響は今回はわからないが、同一林分であることを考えれば下木の樹高成長は上木の存在が重要な要因となっており、上木と下木の本数密度はあまり影響しないと考えられる。よって、下木の樹高成長は周囲の環境に対する反応が鈍く、上木の存在が成長抑制を生み、下木の樹高成長にある一定の平均をつくり、一定の平均にそって様々な個体が存在するのではないかと考えられる。一斉林でも、樹高成長は周囲の環境に対する反応が鈍いといわれている。

次に、胸高断面積合計と材積合計について比較する。

上木胸高断面積合計と上木材積合計では上木本数密度の高いプロットほど大きくなっている。これらはそれぞれ上木平均胸高断面積、あるいは上木平均材積と上木本数密度の後で計算される

ので、上木平均胸高直径や上木平均樹高に大きな差がない今回の場合、上木本数密度の違いが直接現れたものと考えられる。

下木胸高断面積合計は、皆伐区に関しては本数密度が最も低いにもかかわらず、最も大きくなっている。これは皆伐区の平均胸高直径が二段林区各区画の下木平均胸高直径に比べてきわめて大きくなっているためである。他の区画に関しては、下木本数密度が低いほど下木平均胸高直径も小さくなっているため、下木胸高断面積合計も下木本数密度が低いほど小さくなっている。下木材積合計も下木胸高断面積合計と同様の理由で同様の状態になっていると考えられる。

下木相対幹距は皆伐区の本数密度が最も低いにもかかわらず、最も小さくなっている。これは皆伐区の平均樹高が二段林区各区画の下木平均樹高に比べてきわめて大きくなっているためである。他の区画に関しては、下木平均樹高に差がないので、下木本数密度が大きいほど小さくなっている。

以上のことより、林分特性値で見た場合、複層林下木の直径成長は上木本数密度が高いほど抑制され、下木の樹高成長は上木の存在に強く抑制されることがわかった。

上木と下木の胸高断面積合計と材積合計は、皆伐区の胸高断面積合計が $54.7 \text{ m}^2/\text{ha}$ に対して二段林区が $65.8 \sim 52.2 \text{ m}^2/\text{ha}$ 、また、皆伐区の材積合計が $507.7 \text{ m}^3/\text{ha}$ に対して二段林区が $534.6 \sim 430.8 \text{ m}^3/\text{ha}$ と、ともに各試験区において大差がなかった。これは先に記したような上木と下木の胸高断面積と材積の傾向からくるものである。このことから複層林は環境保全機能の面からだけでなく、林分の材積量のみを経営の目的とした際には、下木と同時期に植栽した一斉林の材積に対して複層林の林分材積が劣るわけではないと考えられる。

1.2 樹幹解析の結果による比較

樹幹解析の結果から、下木の直径と樹高に関する林分レベルの成長過程の差を検討した。

1.2.1 胸高直径

まず、胸高直径の成長過程について考察する。図-2 は胸高直径の連年成長量を区画ごとに示した図である。いずれの区画においても、10~15年にピークを迎えるカーブを描く傾向が見られる。すなわち、直径の成長過程は連年成長量を見る限り、一斉林においても、複層林においても林齢と関係があると考えられる。また、成長過程は、一斉林においても、複層林においても同様のものであるといえる。一方、図-3 は胸高直径の総成長量を区画ごとに示した図である。総成長量の大きさの順位はほとんど一定のまま増加している。また、対象木の条件によって、連年成長量に差が出るため、結果として総成長量に幅が出てくる。ただ、最終的な総成長量のばらつきは各区画とも同様である。最後に、図-4 は胸高直径の総平均成長量を区画ごとに示した図である。皆伐区においては、10~15年にピークを迎え、その後減少していく過程が見られる。しかし、二段林区においては、10~15年にピークを迎え、その後は総平均成長量の変化が、皆伐区ほど見られない。これは、ピークときの成長量を抑えられているため、ピークとき以降の下木の連年成長量の減少が一斉林に比べて小さいものとなっているためであると考えられる。成長量の保持に関して、家原(1992)の資料によると、対象は中国地方のヒノキのデータであるが、「上木がなくなったあとには、試験地のヒノキの樹高が急激に大きくな」ったとある。記述では樹高の説明がしてあるが、同論文の表では直径に関しても同様な現象が起こっている。すなわち、下木の直径成長はピークときの成長量が抑えられているため、環境が下木に有利な状態になった場合、一斉林では連年成長量の減少が起こっている林齢であっても、林齢にかかわらず連年成長量の維持、

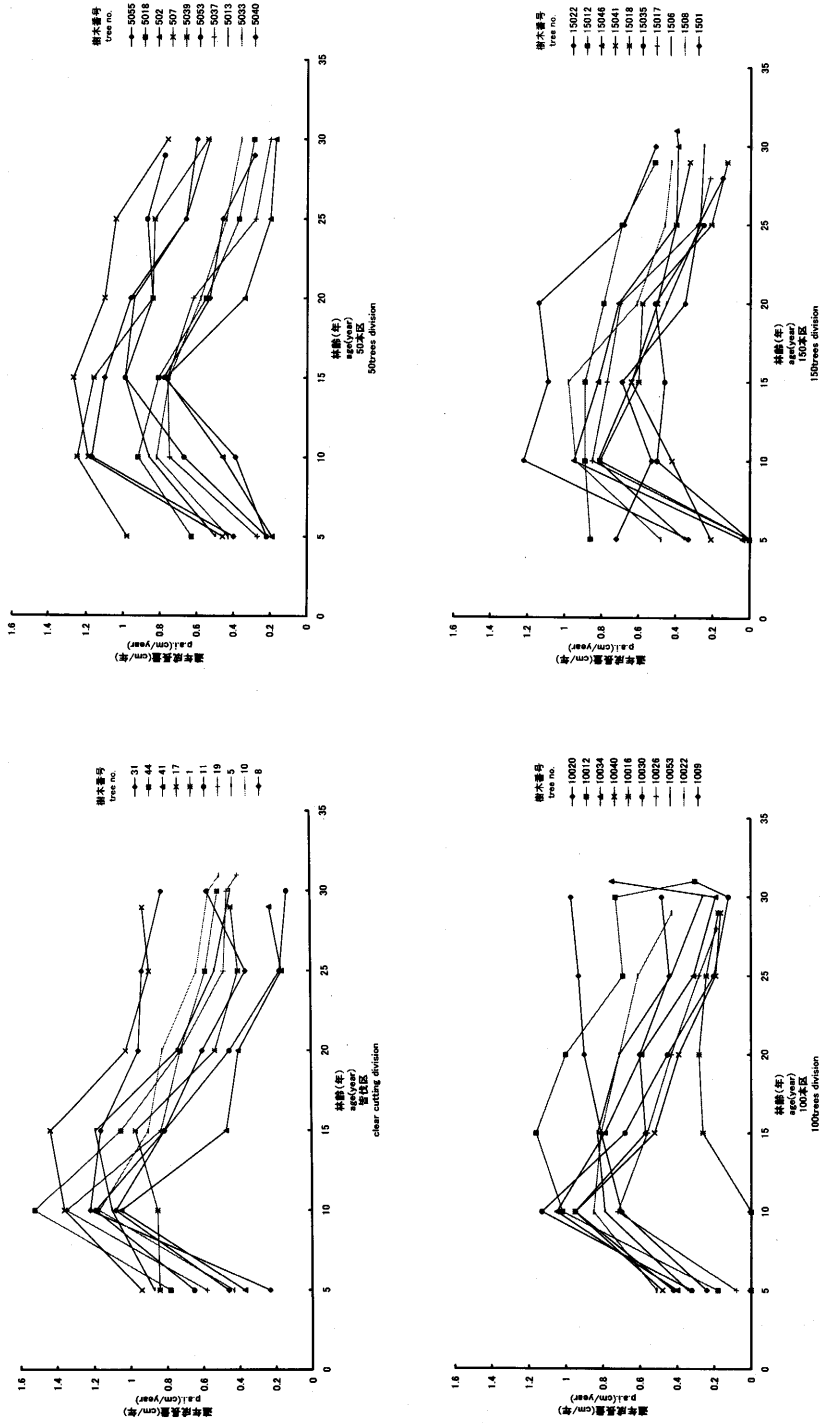


図-2 胸高直径の連年成長量
Fig. 2. p.a.i. of d.b.h.

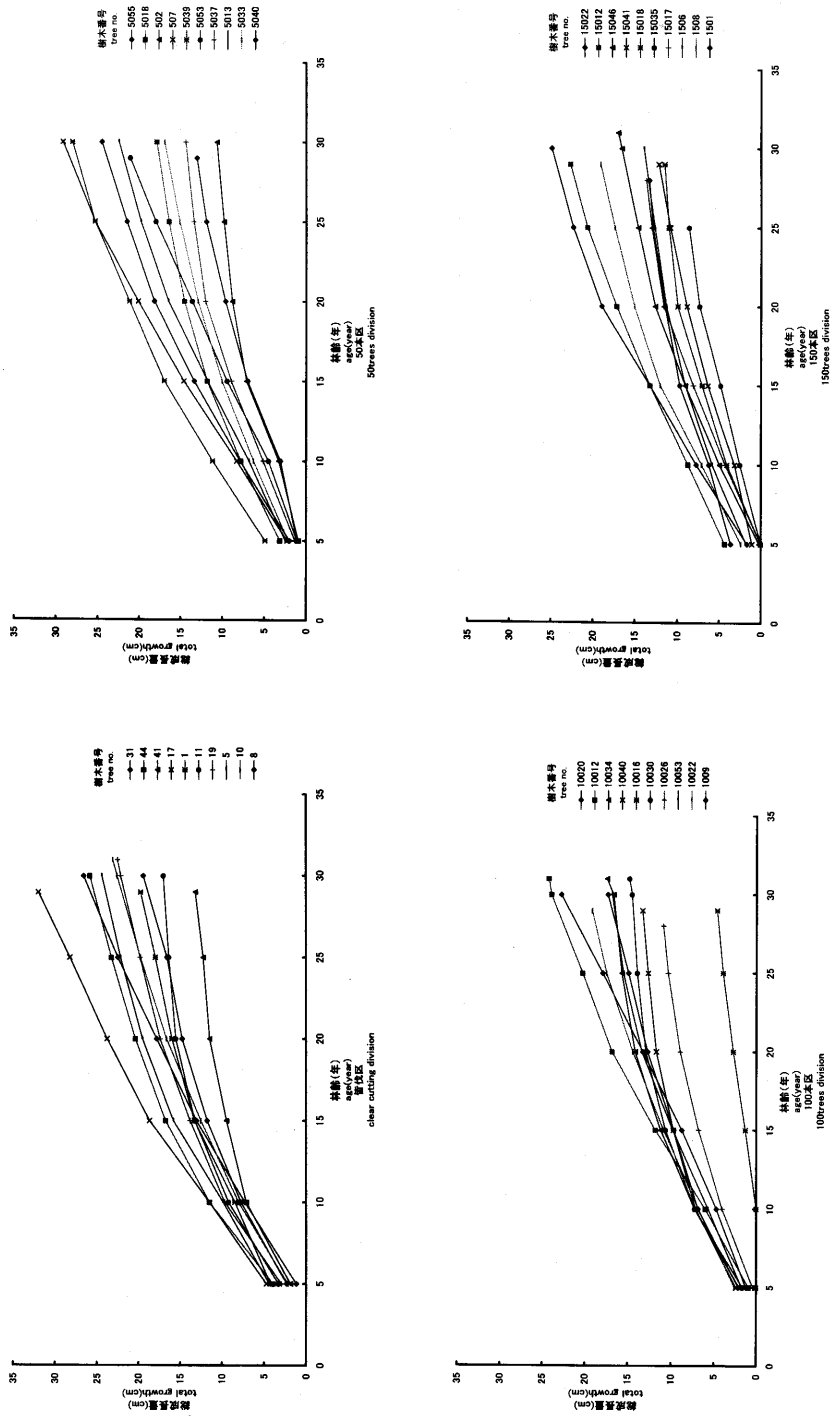


図-3 胸高直径の総成長量
Fig. 3. Total growth of d.b.h.

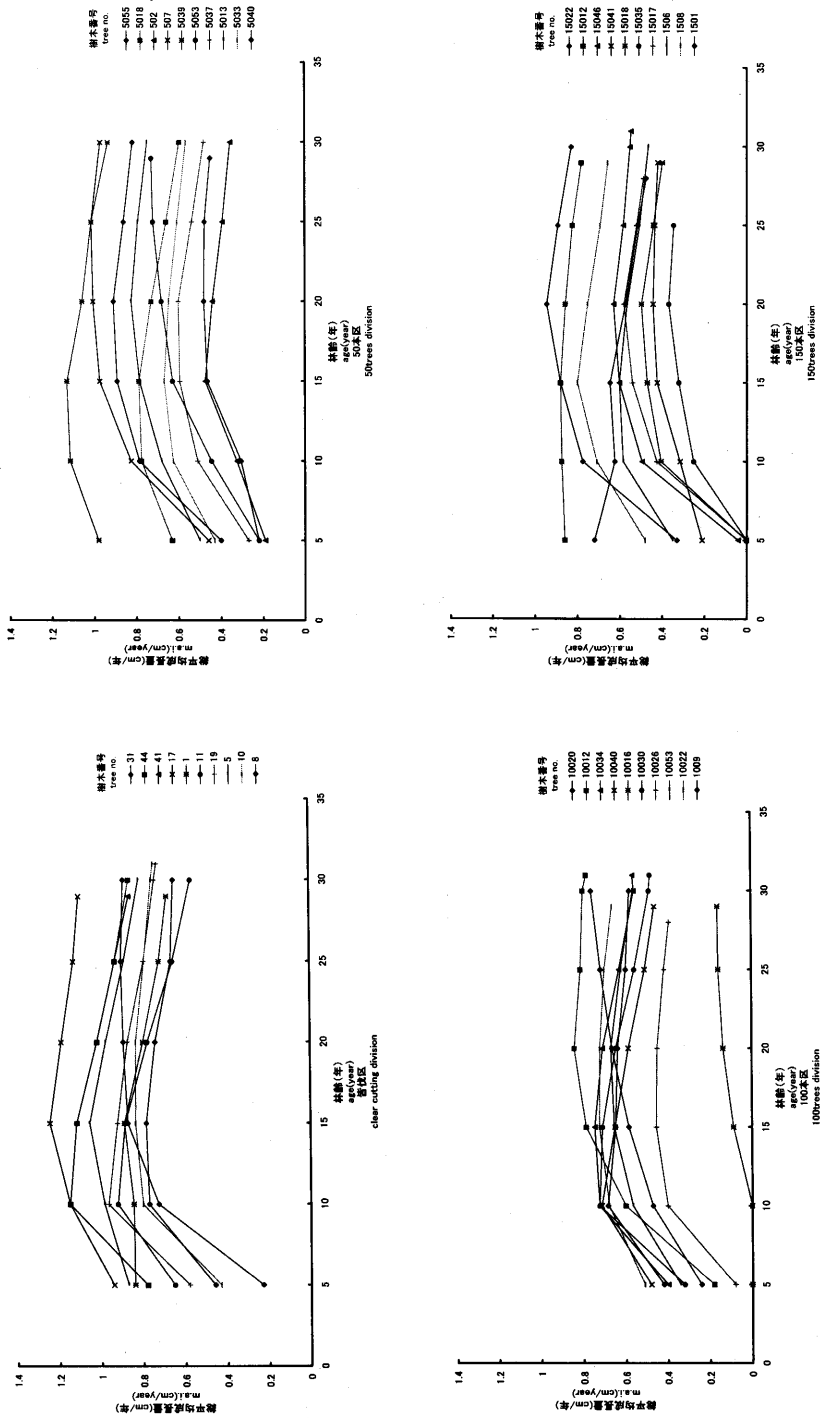


図-4 胸高直径の総平均成長量 Fig. 4. m.a.i. of d.b.h.

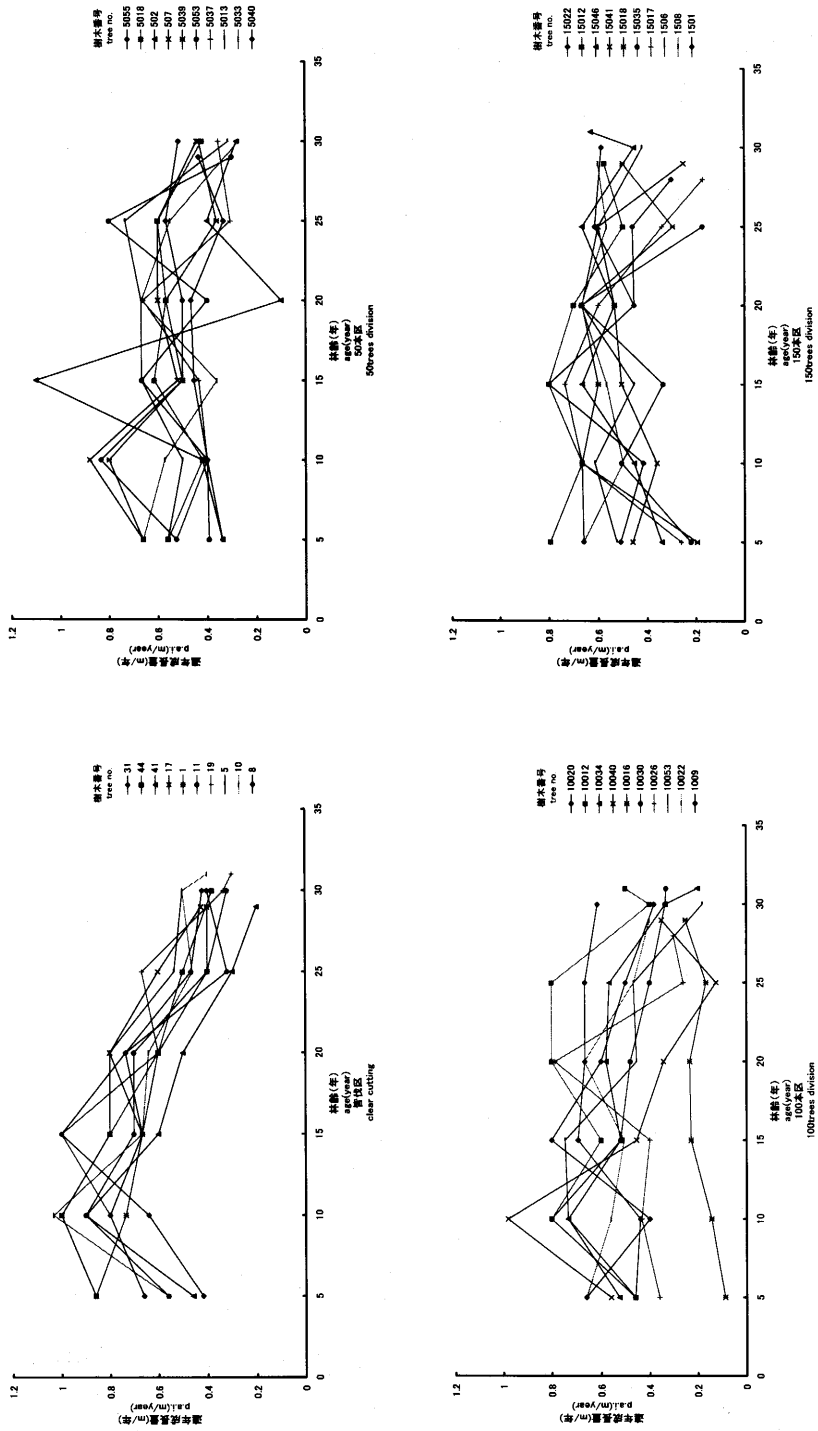


図-5 樹高の連年成長量
Fig. 5. p.a.i. of height.

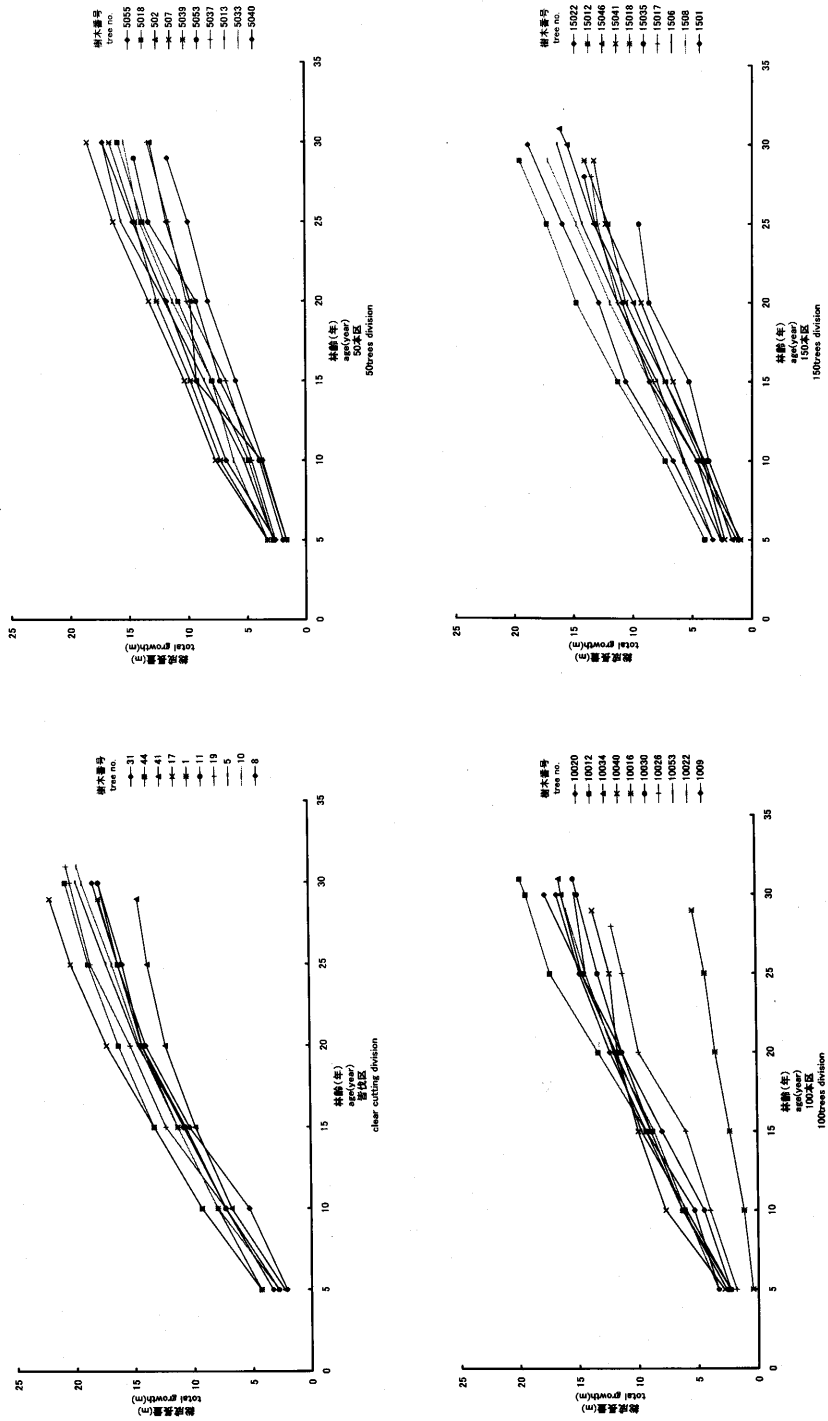


図-6 樹高の総成長量
Fig. 6. Total growth of height.

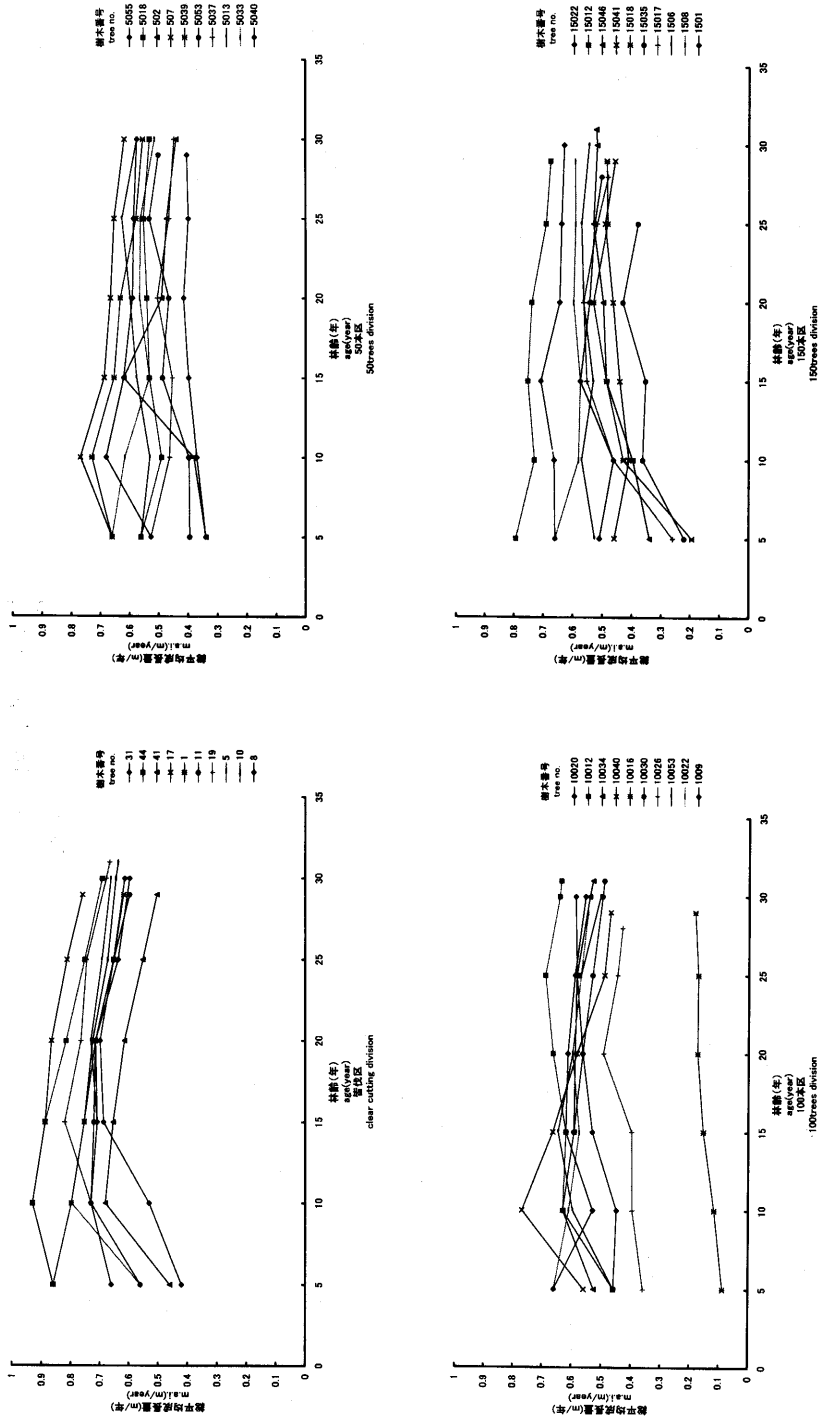


図-7 樹高の総平均成長量
Fig. 7. m.a.i. of height.

または、増加が起こる可能性もあると考えられる。

以上のことより、下木の胸高直径の成長過程は一斉林と同様であるが、ピークときの成長量の抑制のために、将来において成長量の維持、もしくは増加の可能性を含むと考えることができる。

1.2.2 樹高

次に、樹高の成長過程について考察する。図-5は樹高の連年成長量を試験区ごとに示した図である。皆伐区においては、胸高直径の成長過程と同様に、10～15年にピークを描く傾向が見られるものの、二段林区においては、そのような傾向はまったく見られない。下木の樹高の成長過程はジグザグになっており、連年成長量を見る限り、一定の傾向は見いだせない。また、林齢との関係も見いだせない。樹高は直接測定したのではなく、2 m 間隔の円板の年輪から計算によって得られた値であること、年輪の読み落とし等の人為的誤差というのもジグザグになる一因であるかもしれない。一方、図-6は樹高の総成長量を区画ごとに示した図である。総成長量は連年成長量の影響を受け、大きさの順位の逆転を繰り返しながら増加している。最終的な総成長量のばらつきは、皆伐区に比べ、二段林区において大きくなっている。樹高の上限値は、皆伐区と二段林区に関しては差があるものの、二段林区においては、上木密度に関係なく、20 m 当たりとなっている。最後に、図-7は樹高の総平均成長量を区画ごとに示した図である。皆伐区においては、胸高直径と同様、10～15年にピークを迎えるが、二段林区にはピークが見られない。むしろ、総平均成長量は横ばいであるといえる。このことは、連年成長量が、でたらめにジグザグになっているのではなく、増加した5年間のあとの5年間は減少するというような状態を表している。すなわち、ジグザグのパターンと林齢の間には関係は見いだせないものの、パターンには一定の法則があると思われる。また、胸高直径と同様、総平均成長量が横ばいになっており、明らかな成長のピークが見られないことから、環境が下木に有利な状態になった場合、将来において成長量の維持、または、増加が起こる可能性もあると考えられる。

以上のことより、下木の樹高の成長過程はまず、一斉林と複層林とでは大きく異なり、増加減少を交互に繰り返していることが考えられる。次に、連年成長量に明らかなピークをもたないために、胸高直径と同様に、将来において成長量の維持、もしくは増加の可能性を含むと考えることができる。

2. 距離従属型下木成長モデルの作成

解析には皆伐区のデータを使用しなかった。林分レベルの解析結果から、基本的に一斉林と二段林下木の成長過程や成長量に違いがあると考えたからである。一方、二段林に関しては成長過程が同じで、成長量は上木の本数密度による違いしかないと考え、各区画のデータとも同様に扱った。また、樹幹解析を行った40本のうち、競争尺度の解析に使用したのはそのうちの13本である。これは、上述の通り、まず、皆伐区のデータをはずし、次に、残った複層林下木30本から、競争尺度のなかには林縁木は計算できないものもあるので、すべての林縁木をはずした結果である。連年成長量は林齢25～30年時のものを使用している。また、各競争尺度は樹木位置データを使用して計算している。

① APA (図-8)

4～6 m²のあたりに集中している。APAが機械的に平面を2等分したものであると考えると、傾向のなさが理解できる。

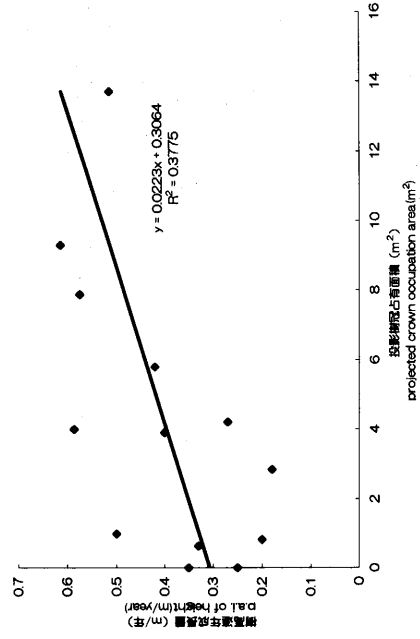
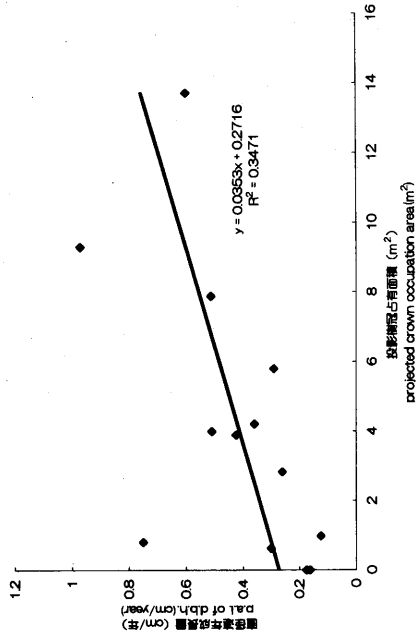


図-9 投影樹冠占有面積と各連年成長量の関係
Fig. 9. Relationships between projected crown occupation areas and each p.a.i.

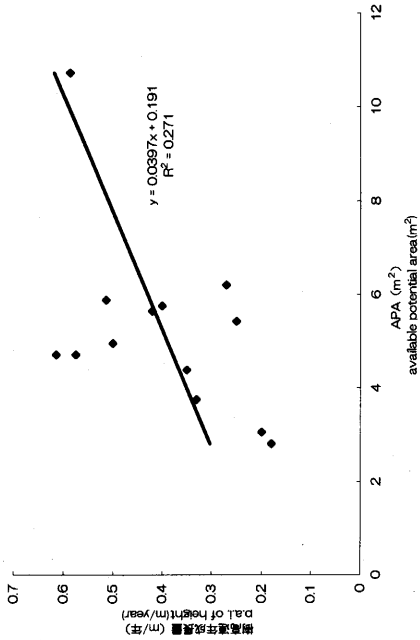
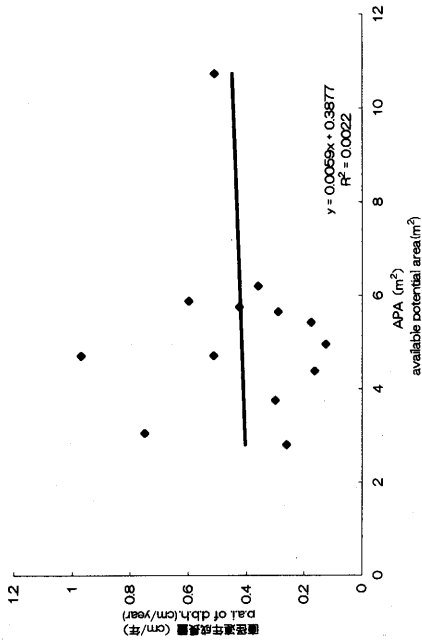


図-8 APA と各連年成長量の関係
Fig. 8. Relationships between APA and each p.a.i.

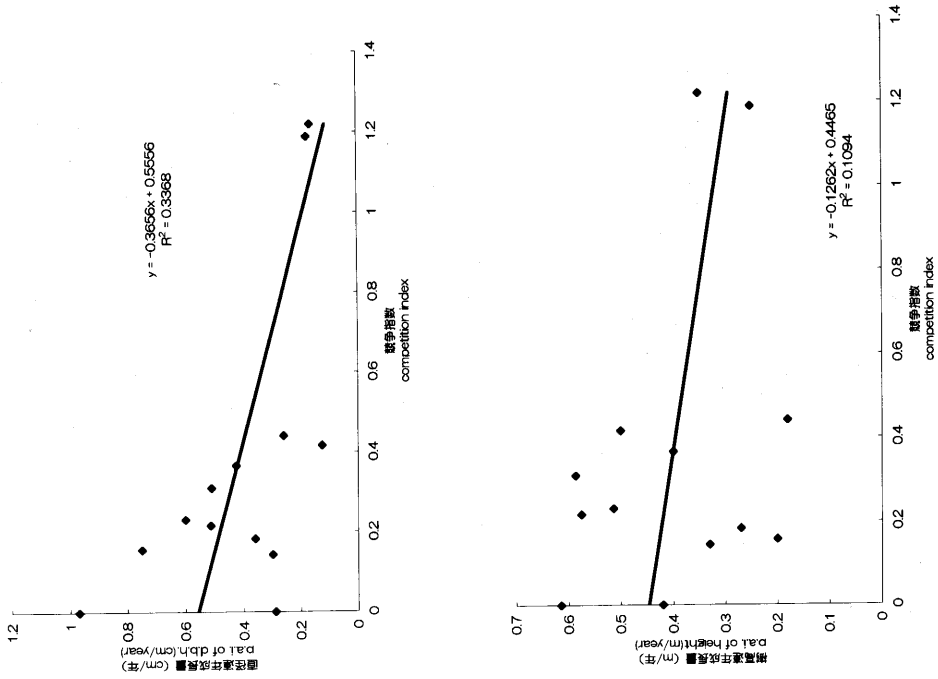


図-11 競争指数と各連年成長量の関係
Fig. 11. Relationships between competition index and each p.a.i.

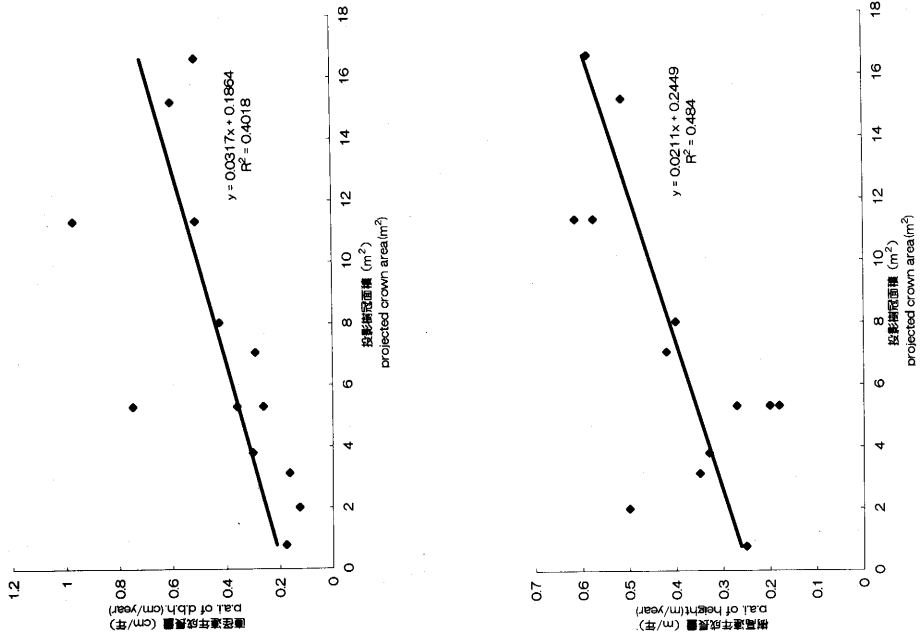


図-10 投影樹冠面積と各連年成長量の関係
Fig. 10. Relationships between projected crown areas and each p.a.i.

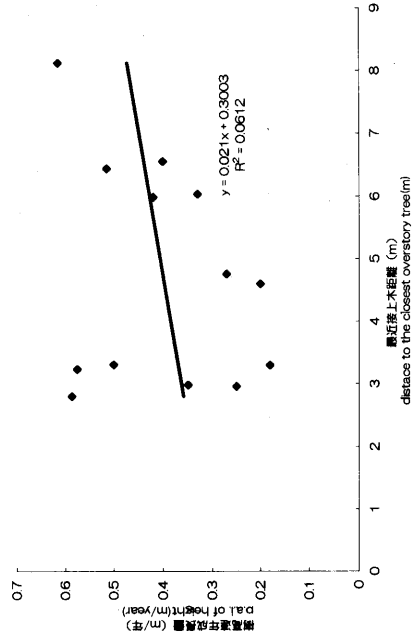
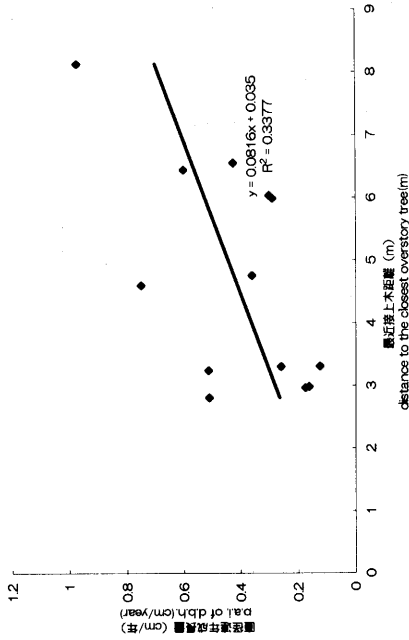


図-13 最近接上木距離と各連年成長量の関係

Fig. 13. Relationships between distance to the closest overstory trees and p.a.i.

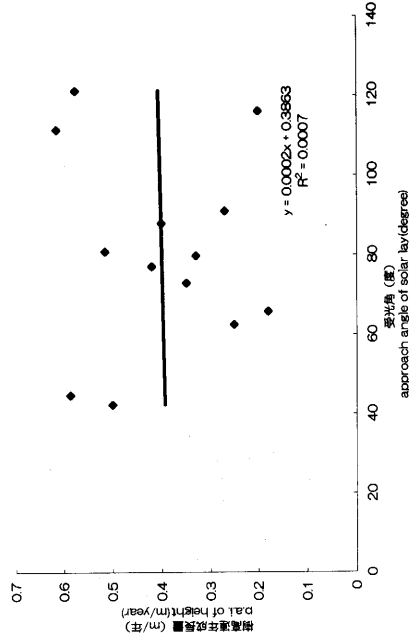
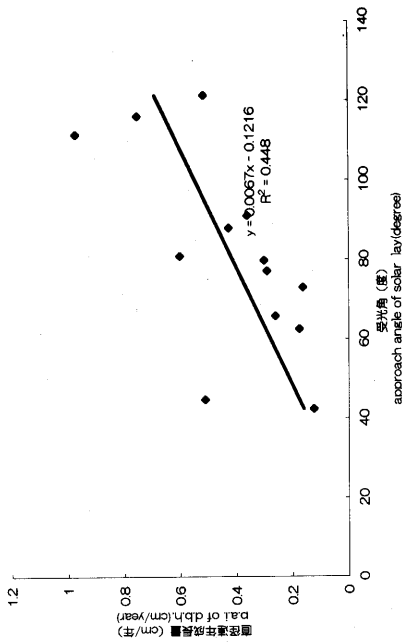


図-12 受光角と各連年成長量の関係

Fig. 12. Relationships between approach angle of solar ray and each p.a.i.

② 投影樹冠占有面積 (図-9)

0~8 m² 当たりには散らばっている。直径に関しては、面積が大きくなるほど成長量も大きくなっているが、ばらつきの幅は面積が小さくなるほど大きくなっているように見える。樹高は一定の上限値をもって、面積が小さくなるほどばらつきの幅が大きくなっている。

③ 投影樹冠面積 (図-10)

0~16 m² のあたりにまんべんなく散らばっている。直径に関しては、面積が大きくなるほど成長量も大きくなっており、ばらつきの幅も大きくなっている。樹高に関しては、一定の上限をもってまんべんなくばらついている。

④ 競争指数 (図-11)

0~1.2 のあたりではばらついている。直径に関しては競争指数が小さいほど成長量の上限が大きくなり、ばらつきの幅も大きくなる。樹高に関しては、直径ほどの傾向は見えないが、直径に似た傾向をもっている。

⑤ 受光角 (図-12)

20~60 度のあたりではばらついている。直径に関しては、まんべんなくばらついているので傾向は見えない。樹高に関しては、一定の上限をもって、まんべんなくばらついている。

⑥ 最近接上木距離 (図-13)

3~7 m のあたりに散らばっている。直径に関しては距離が遠くなるほど、成長量が大きくなるように見えるが、樹高に関しては上限が一定で、距離が近くなるほどばらつきの幅が大きくなっている。

以上の結果から、まず直径に関して考察する。直径に関しては相関の大きいもしくは小さいがあるにせよ、傾向として競争状態が激しくなくなるほど成長量の上限も大きくなり、また、成長量のばらつきも大きくなる。相関に関してはデータの少なさによって左右されているところが大きいので、あまり絶対的なものではない。競争尺度と成長量の上限およびばらつきの関係は、石橋・宗里・関(1995)も周囲密度の観点から以下のように指摘している。「成長量と周囲木の関係は、単に周囲密度が高くなれば立木の成長量が少なくなるといった関係ではなく、成長量のばらつきの幅を制限する関係ではないかと推察される。すなわち、周囲密度が低い状態では成長量の範囲の幅が広く成長のよい木から成長の悪い木までさまざまな成長量の立木が存在するが、周囲密度が高くなれば成長の範囲は狭まり、成長の悪いものばかりになってしまうという関係である。この結果、周囲密度によって成長量の上限が決められ、決められた範囲のなかにおいて他のさまざまな成長因子の影響によって各立木の成長量が決定されているという可能性が考えられる。」ここで、周囲密度も競争尺度の一つと考えたと(APAのような点密度の逆数が周囲密度である)、周囲密度にかかわらず、この競争尺度は成長量の上限とばらつきしか表現できないといえる。

一方、樹高に関しては、直径と同様に、競争尺度と成長量の相関は大きいものも小さいものもあるが、総じて直径よりも相関が低い。また、直径とは異なり、競争状態にかかわらず、成長量の上限が一定である傾向が見られる。ここから、一般にいわれているように、樹高成長は距離従属的な変化に対してあまり敏感に反応しない成長量ではないかと考えられる。しかし、一つの林分の樹高をヒストグラムに置き換えると単峰型になり、直径と樹高が相関をもつことを考えると、樹高成長は他の要因によって決定するのではないかと考えられる。

表-2 説明変数の組み合わせおよび決定係数
Table 2. Combinations and coefficients of determination between explanatory variables

| | | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|--|
| 説明変数 explanatory variable | apa available potential area | apa available potential area | apa available potential area | apa available potential area |
| | 樹冠投影面積 projected crown area | 樹冠投影面積 projected crown area | 樹冠投影面積 projected crown area | 樹冠投影面積 projected crown area |
| | 樹冠投影占有面積 projected crown occupation area | 樹冠投影占有面積 projected crown occupation area | 樹冠投影占有面積 projected crown occupation area | 樹冠投影占有面積 projected crown occupation area |
| | 受光角 approach angle of solar ray | 受光角 approach angle of solar ray | 受光角 approach angle of solar ray | 受光角 approach angle of solar ray |
| | 競争指数 competition index | 競争指数 competition index | 競争指数 competition index | 競争指数 competition index |
| | 最近接上木距離 distance to the closest overstorey tree | 最近接上木距離 distance to the closest overstorey tree | 最近接上木距離 distance to the closest overstorey tree | 最近接上木距離 distance to the closest overstorey tree |
| 決定係数 coefficient of determination | 0.6863 | 0.6764 | 0.6323 | 0.7629 |
| 説明変数 explanatory variable | apa available potential area | apa available potential area | apa available potential area | apa available potential area |
| | 樹冠投影面積 projected crown area | 樹冠投影面積 projected crown area | 樹冠投影面積 projected crown area | 樹冠投影面積 projected crown area |
| | 樹冠投影占有面積 projected crown occupation area | 樹冠投影占有面積 projected crown occupation area | 樹冠投影占有面積 projected crown occupation area | 樹冠投影占有面積 projected crown occupation area |
| | 受光角 approach angle of solar ray | 受光角 approach angle of solar ray | 受光角 approach angle of solar ray | 受光角 approach angle of solar ray |
| | 競争指数 competition index | 競争指数 competition index | 競争指数 competition index | 競争指数 competition index |
| | 最近接上木距離 distance to the closest overstorey tree | 最近接上木距離 distance to the closest overstorey tree | 最近接上木距離 distance to the closest overstorey tree | 最近接上木距離 distance to the closest overstorey tree |
| 決定係数 coefficient of determination | 0.7351 | 0.6123 | 0.6672 | 0.6424 |
| | 0.6625 | 0.6764 | 0.6625 | 0.6625 |

樹幹解析における樹高の連年成長量の状態と単木の解析結果から、周囲の競争状態から直接に連年成長量を求めるのは直径が妥当であるとし、直径の連年成長量と各競争尺度で重回帰分析をした。

ここで、重回帰分析とは、 p 個の説明変数（独立変数）とある目的変数（従属変数）の間に式をあてはめ、目的変数の変動が説明変数の変動によってどの程度影響されるかを分析する手法である。説明変数間に高い相関があると多重共線性という現象が発生する。その場合は相関の高い変数のいずれか一方を除いて再度分析を行う。

本研究では説明変数が競争尺度で目的変数が下木直径の連年成長量である。多重共線性が発生した場合変数を交互に減らし、できる限り多くの変数を残して重回帰分析を行ったところ、組み合わせおよび決定係数は表-2の通りであった。最も相関がよかったのは、投影樹冠面積、競争指数、受光角、最近接上木距離を説明変数とした場合だった。それぞれの説明変数間の相関係数は表-3の通りであり、多重共線性は発生していないので説明変数間には高い相関があるとはいえない。最も相関が高かった組み合わせから競争指数をはずした場合の決定係数は最も相関が高かった組み合わせの決定係数より 0.002 低かった。モデルを構成する説明変数は少ない方が望ましいと考えられるが、今回の場合、わずかながらも決定係数に差があり、説明変数を減らす十分な理由が見つからなかったため、連年成長量を求める式に競争指数を残した。

$$\Delta d = 0.023986x_1 + 0.004757x_2 - 0.1249x_3 + 0.030605x_4 - 0.28257 \quad (r^2 = 0.7629)$$

ただし、 Δd : 下木直径の連年成長量

x_1 : 投影樹冠面積

x_2 : 受光角

x_3 : 競争指数

x_4 : 最近接上木距離

この式は縦方向の競争状態として受光角、横方向の競争状態として投影樹冠面積、競争指数、最近接上木距離を含んでいるので、連年成長量を 3次元空間情報から求めているといえる。な

表-3 説明変数間の相関係数

Table 3. Correlation coefficients between explanatory variables

| 相関行列 | 樹冠投影面積 | 受光角 | 競争指数 | 最近接上木距離 | 胸高直径連年成長量 |
|---|----------------------|-----------------------------|-------------------|--|---------------|
| correlation matrix | projected crown area | approach angle of solar lay | competition index | distance to the closest overstory tree | p.a.i. of dbh |
| 樹冠投影面積 projected crown area | 1.0000 | | | | |
| 受光角 approach angle of solar lay | 0.1741 | 1.0000 | | | |
| 競争指数 competition index | -0.4862 | -0.4093 | 1.0000 | | |
| 最近接上木距離 distance to the closest overstory tree | 0.2782 | 0.4548 | -0.6018 | 1.0000 | |
| 胸高直径連年成長量 p.a.i. of dbh | 0.6339 | 0.6693 | -0.5804 | 0.5812 | 1.0000 |

お、スギ以外の樹種にこの式が当てはまるかどうかはわからない。また、林齢に関しても下木の連年成長量が比較的安定してきた時期のデータを用いて重回帰分析を行っているので、若齢時のような連年成長量の変動の大きい時期には適用は困難であろう。

一方、樹高に関しては胸高直径総成長量と樹高総成長量の相関が高かったので、得られた胸高直径総成長量から樹高総成長量を推測することにした。

$$h = 7.77691n(d) - 6.9598 \quad (r = 0.85)$$

ただし、 h : 樹高総成長量 (m)

d : 胸高直径総成長量

なお、今回求めた修正係数は図-14 のようになった。平均は 1.15, 標準偏差は 0.36, 最小が 0.45, 最大は 1.78 であった。

また、成長予測に用いた下木をミッチャーリッヒ曲線にあてはめた際のパラメータは表-4 のようになった。

解析結果から作成された重回帰式を含む成長モデル (図-15) を利用して、現状のまま推移した場合と上木を伐採した場合の下木の胸高直径を当年から 5 年間予測した結果 (表-5), 前者に比べ後者の方が成長がよく, 上木との競争状態の差によって成長に差が現れるという結果が得られた。

樹高に関しても、現状のまま推移した場合と上木を伐採した場合の下木樹高成長を当年から 5 年間予測した結果, 前者に比べ後者の方が成長がよく, 上木との競争状態の差によって成長に差が現れるという結果が得られた。なお、例に示した 5040 は 50 本区, 10020 は 100 本区, 15022 は 150 本区の下木である。

以上の結果から、この成長モデルを使うことにより、時系列的な予測に加えて競争状態が変化した場合の複層林下木の成長予測が可能になると考えられる。また、このモデルを応用すること

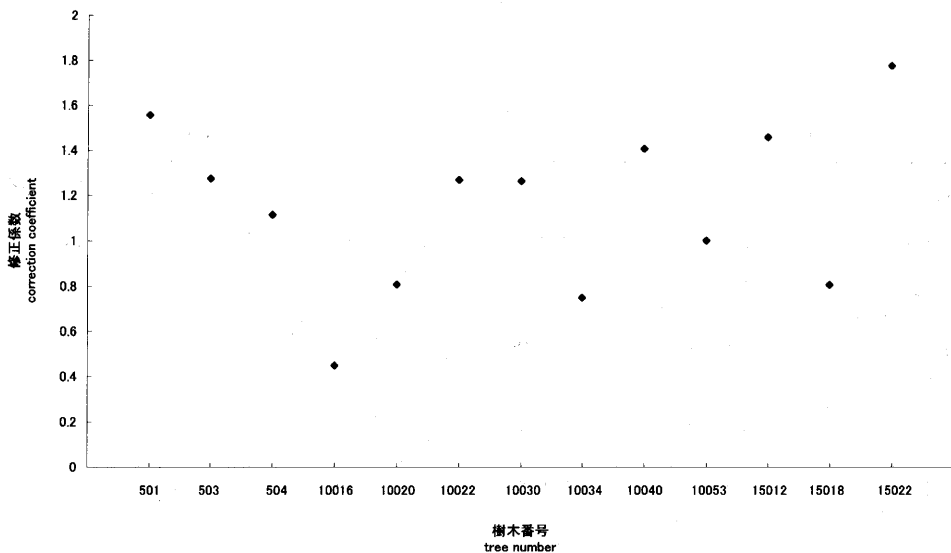


図-14 修正係数

Fig. 14. Correction coefficient.

表-4 ミッチャーリッヒ曲線のパラメータ
Table 4. Parameters of Mitscherlich curve

| number | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>k</i> |
|--------|----------|----------|----------|
| 5018 | 22.167 | 1.165 | 0.060 |
| 5033 | 24.759 | 1.134 | 0.043 |
| 5040 | 40.129 | 1.142 | 0.036 |
| 10016 | 8.403 | 1.661 | 0.050 |
| 10020 | 123.128 | 1.032 | 0.007 |
| 10022 | 36.451 | 1.076 | 0.029 |
| 10030 | 15.667 | 1.516 | 0.104 |
| 10034 | 19.854 | 1.303 | 0.073 |
| 10040 | 14.425 | 1.352 | 0.097 |
| 10053 | 24.386 | 1.185 | 0.046 |
| 15012 | 47.428 | 1.026 | 0.024 |
| 15018 | 13.217 | 1.788 | 0.094 |
| 15022 | 34.649 | 1.310 | 0.052 |

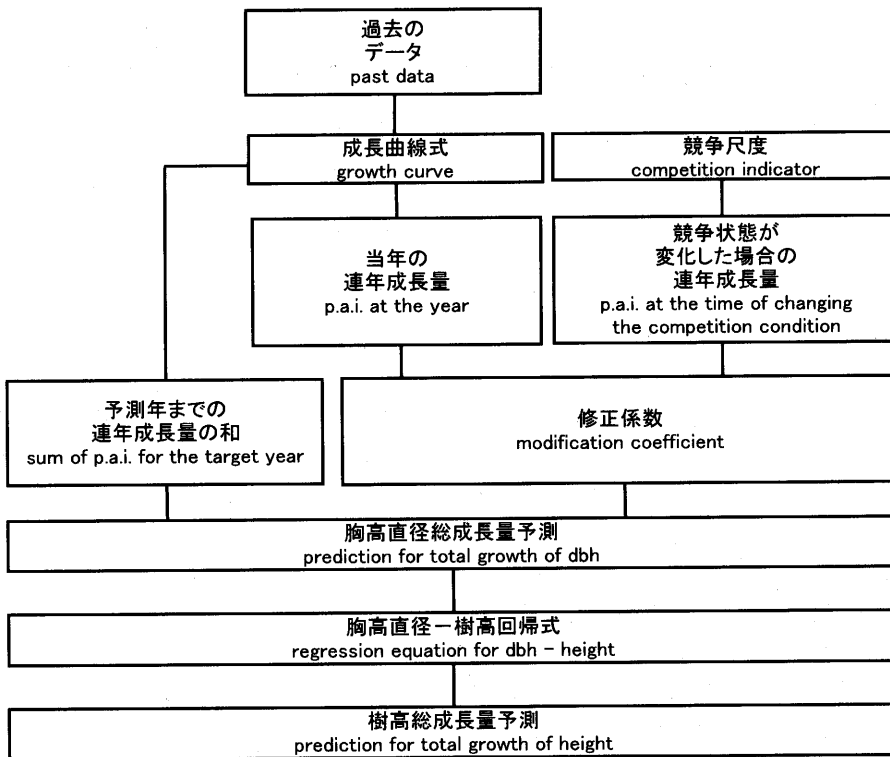


図-15 成長モデルの流れ図
Fig. 15. Flowchart of growth model.

で、下木の間伐木の選定、上木伐採後の成長予測が行える。なお、データの制約より修正係数を一定としたことは本モデルの問題点の一つであり、競争状態および修正係数の時間的变化を考慮

表-5 上木を伐採した場合と現状のまま推移した場合の成長予測の差の例

Table 5. Example of difference in growth prediction between the case of cutting overstory trees and present state

| | 胸高直径 dbh | | | 樹 高 height | | |
|---------------------------|---------------------------------------|---|---|---------------------------------------|---|---|
| | 5040 の差 difference in 5040 (cm) | 10020 の差 difference in 10020 (cm) | 15022 の差 difference in 15022 (cm) | 5040 の差 difference in 5040 (cm) | 10020 の差 difference in 10020 (cm) | 15022 の差 difference in 15022 (cm) |
| | 当 年 at the time | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1 年後 one year later | 0.01 | 0.01 | 0.47 | 0.00 | 0.00 | 0.14 |
| 2 年後 two years later | 0.01 | 0.03 | 0.92 | 0.00 | 0.01 | 0.27 |
| 3 年後 three years later | 0.02 | 0.04 | 1.34 | 0.01 | 0.01 | 0.39 |
| 4 年後 four years later | 0.02 | 0.05 | 1.74 | 0.01 | 0.02 | 0.50 |
| 5 年後 five years later | 0.03 | 0.06 | 2.12 | 0.01 | 0.02 | 0.60 |

注：成長予測の差＝上木を伐採した場合－現状のまま推移した場合。

Note: difference in growth prediction＝the case of cutting overstory trees－the case of present state.

に入れた長期予測に耐えるモデルの開発を今後の課題としたい。

お わ り に

本研究は人工二段林における林分構造の解析および距離従属型下木成長モデルの作成を行ったものである。林分構造の解析においては、下木の直径成長過程は一斉林と同様で、樹高成長過程は一斉林と異なり、明らかなピークをもたないことがわかった。また、成長量の解析の結果、直径総成長量の平均値は上木本数密度に左右され、樹高総成長量の平均値は上木本数密度に左右されないということがわかった。距離従属型下木成長モデルの作成においては、直径に関しては競争状態が弱くなるほど連年成長量の上限は大きくなり、ばらつきも大きくなることがわかった。樹高に関しては、競争状態に関係なく、一定の上限のもとで成長しているように見受けられた。また、林分構造の解析および競争尺度の解析から、競争尺度から求める連年成長量は下木直径が妥当であるとし、重回帰分析を行った。以上のことから成長モデルを用いて成長予測を行った結果、樹高成長および直径成長とも現在の状態のまま推移した林分よりも、上木の伐採を行った林分の林木の方が成長がよかった。

本研究では、①樹高の成長に影響を与える要因は今のところ未知であること、②下木の連年成長量が比較的安定してきた時期のデータを用いて重回帰式を導きだしたので、重回帰式は変動が大きい若齢林木の成長量に対しては当てはまりが悪くなるであろうことが問題として残った。また、③成長モデルにおいて修正係数を不変としたことについては今後シミュレーション等を通じて検討する予定である。

要 旨

本研究では、二段林下木の林分構造を解析するとともに、距離従属型の二段林下木の成長モデルを作成することを目的とした。調査地としては東京大学千葉演習林内のスギ・スギの二段林試験地を使用した。この試験地には同一林分内に上木の密度がヘクタール当たり 150 本、100 本、50 本の区画と皆伐区の 4 区画が設定されている。試験地において林分構造調査を行い、さらに各区画において下木を 10 本ずつ樹幹解析した。林分構造について見ると、下木の直径成長は上木の密度に影響されていたが、樹高成長は区画間では差がなかった。また、樹幹解析の結果から、直径の成長過程は一斉林と同様であるが、樹高の成長過程は一斉林とは異なることがわかった。成長モデルを作成するために競争状態の解析を行った。直径に関しては、個々の競争状態を表現するための尺度（競争尺度）では成長量の上限とばらつきしか表現できないことがわかった。樹高は競争尺度とは相関が見られなかった。そこで直径成長量そのものを表現するためにいくつかの競争尺度を同時に考慮した重回帰分析を行った。成長予測をするにあたっては、まず、成長曲線から連年成長量を求め、次いでそれに修正係数をかけて、競争状態を加味した成長量を算出する。ただし、修正係数とは重回帰式から得られた連年成長量を成長曲線から得られた連年成長で割ったものである。この成長モデルを使うことにより、時系列的な予測に加えて競争状態が変化した場合の複層林下木の成長予測が可能になると考えられる。

キーワード： 下木, 人工二段林, 林分構造, 距離従属型成長モデル, 競争指数, 修正係数

引 用 文 献

- BROWN, G. S. (1965) Notes, New Zealand For. Res., **38**, 1-17.
- NEWHAM, R. M. (1964) The Development of a Stand Model for a Douglas-Fir, pp. 201, Univ. British Columbia, Vancouver.
- 安藤 貴・竹内郁雄・宮本倫仁・桜井尚武 (1983) スギ・ヒノキ二段林上木間伐試験地の林分成長, 林試研報, **323**, 182-189.
- 家原敏郎 (1988) アカマツ・スギ・ヒノキ複層林の成長について—地獄谷固定試験地の成長の概要—, 日林論, **99**, 127-128.
- 家原敏郎 (1992) アカマツ・ヒノキ二段林の下木の成長予測, 日林論, **103**, 131-132.
- 石橋整司・宗里哲次・関 裕子 (1995) 林木の空間分布形態と成長, 日林関東支論, **47**, 27-29.
- 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.
- 河原輝彦 (1983) 人工庇陰下の植栽木と樹下植栽木の成長比較, 林試研報, **323**, 133-134.
- 木梨謙吉 (1978) 森林調査詳説, pp. 263-268, 農林出版, 東京.
- 小林正吾 (1975) 占有面積の推移によるカラマツ人工林の林分成長モデル (I)—閉鎖林分の樹高対直径の相対成長モデル—, 日林講, **86**, 68-69.
- 小林正吾 (1976) 占有面積の推移によるカラマツ人工林の林分成長モデル (II)—無間伐モデル林分の樹高対直径の相対成長モデル—, 日林講, **87**, 95-96.
- 小林正吾 (1976) 占有面積の推移によるカラマツ人工林の林分成長モデル (III)—間伐モデル林分の樹高対直径の相対成長モデル—, 日林講, **87**, 97-98.
- 小林正吾 (1978) 占有面積の推移によるカラマツ人工林の林分成長モデル (V)—占有面積の定義とその区画法—, 日林講, **89**, 75-76.
- 笹川裕史・白石則彦・箕輪光博 (1998) 距離従属型の二段林下木成長モデルの作成, 日林論, **109**, 185-189.
- 鈴木 誠・鈴木 保・鶴田 好・高浜静子 (1990) 非皆伐施業における二段林造成に関する研究 (XI)—上層木の密度の違いと下木の現存量—, 日林論, **101**, 55-56.
- 高田和彦 (1992) 森林計測学 40 年, pp. 17, 新潟大学農学部高田和彦教授定年退官記念事業会, 新潟.

- TAKATA, K. (1979) On the Relation of the Diameter Growth of a Single Tree to the Arrangement of Neighbour Tree in the Fichte of West Germany, 新大演報, 12, 1-7.
- 龍原 哲 (1995) 人工複層林の成長に関する理論的研究—スギ二段林の成長モデル—, 東京大学農学部演習林報告, 94, 49-113.
- 中村雅志・石橋整司 (1993) 複層林化されてまもないヒノキ二段林の林分構造と施業実行上の問題点, 日林論, 104, 261-204.
- 南雲秀次郎・箕輪光博 (1990) 測樹学, pp. 184, 地球社, 東京.
- 藤森隆郎 (1992) 複層林マニュアル, pp. 41, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 松本光朗 (1995) 複層林における下木の成長モデルを開発, 現代林業, 4月号, 52-53.
- 林野庁計画課編 (1970) 立木幹材積表, pp. 223, 日本林業調査会, 東京.
- 山本博一 (1993) 二段林の成長予測に関する研究 (II) カラマツトドマツ混植二段林の成長モデルについて, 日林誌, 75(1), 65-69.
- 早稲田 収 (1983) 林内光環境の経年変化, 林試研報, 323, 74-78.

(1999年4月30日受付)

(2000年3月21日受理)

Summary

In this study, aiming at developing a distance-dependent growth model for a double-storied plantation forest, the stand structure of understory trees of a double-storied plantation was analyzed. The study area is located at Chiba Experimental Forest of the University of Tokyo. The experimental plot, a Sugi-Sugi stand, was divided into four parts based on the density of the overstory trees. A survey on the stand structure was carried out in each of the four parts and stem analysis was undertaken on 10 understory trees in each part. Though the understory trees were found to be influenced by the overstory trees in terms of dbh growth, there were no significant differences for the four stands in terms of tree height growth. Stem analysis showed that the double-storied forest has the same process of dbh growth as that of the pure forest. To develop the growth model, competition conditions were analyzed. We devised a "competition indicator" to represent the competition conditions but found that it could only express the upper limit and variance of the growth. For that reason, we employed multiple regression analysis to model the growth of dbh with several competition indicators. Tree height was not related to the competition indicators. For growth prediction, we calculated a modification coefficient by dividing the annual growth calculated from the multiple regression analysis by the annual growth calculated from the growth curve. Growth was then calculated by multiplying the coefficient by the annual growth calculated from the growth curve, considering the competition conditions. This model enables temporal growth prediction for understory trees under various competition conditions.

Key words: Understory trees, Double-storied plantation, Stand structure, Distance-dependent growth model, Competition indicator, Modification coefficient

Wood Properties of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Planted at Gobo-zawa in the University Forest in Chiba

Yoshitaka KUBOJIMA, Hisashi OHSAKI, TOMOYO SAWADA, Kazuhiro ORIGUCHI,
Hiroshi YOSHIHARA and Takeshi OKANO

Properties of 86-year-old sugi wood (*Cryptomeria japonica* D. Don) planted at Gobo-zawa in Tokyo University Forests in Chiba were measured. The tests conducted were soft X-ray measurements, static bending and impact bending tests, compression, torsion, shear and hardness tests, and shrinking tests. The results were as follows:

1) The pattern of variation of the measured wood properties in the radial direction (from pith to bark) mainly followed pattern (a) but some cases followed pattern (b).

a) Around the pith: the values of the properties increased or did not change in most cases, and sometimes had peaks.

Heartwood region, and boundary between heartwood and sapwood: the properties exhibited peaks.

Sapwood region: the properties decreased.

b) They were stable at the pith and heartwood regions.

2) The pattern of variation did not change with the diameter of the logs.

3) The wood properties were related to density and moduli of elasticity at the 1% or 5% significant level in almost all of the cases.

An Analysis of Stand Structure of Understory Trees of a Double-Storied Plantation and Development a Distance-Dependent Growth Model for a Double-Storied Plantation

Hiroshi SASAKAWA, Mitsuhiro MINOWA, Norihiko SHIRAISHI,
MAKOTO SUZUKI, ISAO MURAKAWA and Shigenari SATOMI

In this study, aiming at developing a distance-dependent growth model for a double-storied plantation, the stand structure of understory trees of a double-storied plantation was analyzed. The experimental plot, a Sugi-Sugi stand at the Chiba University Forest, was divided into four parts based on the density of the overstory trees. Though the understory trees were found to be influenced by the overstory trees in terms of dbh growth, there were no significant differences in the four stands to be in terms of tree height growth. This model enables temporal growth prediction for understory trees in terms of changing competition conditions.