

## 樹幹の材積当り呼吸量低下を考慮した人工林成長モデル

鷹尾 元\*・箕輪光博\*\*

### A Stand Growth Model of Coniferous Plantation in the Light of the Reduction in Respiration Per Unit Stem Volume

Gen TAKAO\* and Mitsuhiro MINOWA\*\*

#### はじめに

生物の成長量は同化量と呼吸量の差として表される。この簡単で明瞭な仮定を用いて、多くの生物の成長過程が定量的に記述されている。樹木の成長についてもこの仮定を用いたモデルが多く提案されている。しかし、そのほとんどは、内部組織を木化させて単位体積当りの呼吸量を低下させていく樹木の特殊性を考慮せず、他の生物の成長過程を数値的に当てはめているに過ぎない。しかし、この特殊性こそが、個体の巨大化を可能にする、他の生物にみられない樹木の成長の大きな特徴である。

本論文の目的は、樹木の呼吸の特殊性を踏まえた物質収支の仮定のもとに、人工一斉林分の林分成長モデルを構築することである。成長量と同化量、呼吸量の関係は林分全体と同様に林分内の各単木にも当てはまることに鑑み、林分内の各単木の競争・成長・枯死過程を追跡するために、本論文の林分成長モデルは、既往の知見を各単木への林分生産量分配のサブモデルとして取り入れた単木距離独立型モデルとした。このような単木距離独立型モデルは、コンピュータの発達・普及により、近年容易に構築できるようになってきた。

なお、モデルの検証には、東京大学秩父演習林の樹幹解析資料および間伐試験地資料を使用させて頂いた。ここに感謝の意を表する次第である。

#### I. 成長モデル

##### 1. 物質収支の成長モデル

KIRA and SHIDEI<sup>15)</sup> は林分蓄積の増加について以下のような概念を示している。すなわち、林内の葉量はある林齢以降一定となり、葉部呼吸量、林分のバイオマス総量としての林分総生産量もそれに比例する。林内の非同化部の量は林齢と共に漸増し、非同化部の呼吸量もそれに比例する。したがって、総生産量と呼吸量の差として表させる林分の純生産量は漸減して0に近づき、林内の総蓄積は林分総生産量と総呼吸量の釣合う点で一定となる。

ヒルミ<sup>13)</sup> は林分蓄積の動態をエネルギーの収支の点から明らかにした。太陽光から林分に取り入れられるエネルギー  $\lambda^*$  は林冠閉鎖後に一定になる。林木の生活作用に消費されるエネルギーの量を  $\lambda$ , 新しい組織や器官を形成して林分蓄積を増大させるために消費するエネルギーの量

\* 森林総合研究所林業経営部  
Forest Management Division, Forestry and Forest Products Research Institute.

\*\* 東京大学農学部林学科  
Department of Forestry, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo.

を $\lambda^*_2$ とすると、

$$\lambda^* = \lambda^*_1 + \lambda^*_2 \quad (1)$$

である。 $\lambda^*_1$ が林分蓄積 $V$ に比例するとして次元解析により林分蓄積の変化を微分方程式で表せば、

$$\frac{dV}{dt} = A(\lambda^* - \beta V) \quad (2)$$

となり、その解は、

$$V = A - (A - V_0)e^{-B(t-t_0)} \quad (3)$$

ここで、 $A, B$ : 定数,  $t_0$ : 初期林齢,  $V_0$ :  $t=t_0$ における $V$

この式は、林分の蓄積が林分毎に定まる一定の最大蓄積 $A$ に向かって Mitscherlich の成長関数に従って成長することを示す。

生体個体の成長について、エネルギー収支の点からシステム論的に考察したのは von Bertalanffy が代表的である。von BERTALANFFY<sup>3)</sup>は、動物の体重の成長は構築材料の合成と分解の差によって表現されるとした。そして、動物の器官の間に相対成長から合成は体重の $m$ 乗に、分解は体重に比例するとして次の方程式を導いた。

$$\frac{dw}{dt} = \eta w^m - \kappa w \quad (4)$$

ここで、 $w$ : 体重,  $t$ : 年齢,  $\eta, \kappa, m$ : パラメータ

式<sup>4)</sup>の解は次の式となる。

$$w^{(1-m)} = \frac{\eta}{\kappa} - \left( \frac{\eta}{\kappa} - w_0^{(1-m)} \right) e^{-(1-m)\kappa(t-t_0)} \quad (5)$$

ここで、 $w_0, t_0$ :  $w, t$ の初期値

von Bertalanffy は、合成エネルギー代謝の間に相関関係があるとして動物の体重成長の型を $m$ の値により (1) 代謝が表面積に比例する場合 ( $m=2/3$ ), (2) 代謝が体重に比例する場合 ( $m=1$ ) (3) 中間的な場合 ( $2/3 < m < 1$ ) に分類した。(2)の場合には指数成長、それ以外では上限値 $(\eta/\kappa)^{1/(1-m)}$ に漸近する曲線となる。鈴木<sup>25)</sup>は林木の平均直径成長が Mitscherlich の成長法則に従うとして、体積が直径の3乗に比例するならば林木の成長は(1)の場合にほかならないとした。

RICHARDS<sup>23)</sup>は、植物の成長の解析から、(5)における $m$ の範囲を $0 \leq m$ に拡大し、 $\eta/\kappa = A^{1-m}$ ,  $\beta = \eta/\kappa - w_0^{1-m}$ ,  $k = (1-m)/\kappa$ , さらに $b = \beta A^{m-1}$ と置いて、次式を導いた。

$$w = A(1 - be^{-kt})^{1/(1-m)} \quad (6)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{kw[(A/w)^{1-m} - 1]}{1-m} \quad (7)$$

この関数(以下「Richards関数」と呼ぶ)は $m$ の値によって Mitscherlich, logistic 成長関数およびそれらの中間型をすべて表すことができる。すなわち、 $m=0$ の場合 Mitscherlich 式を、 $m=2$ の場合 logistic 式を表す。

このように、Richards関数は4つのパラメータ $m, A, k, b$ により、既往の成長関数を含め様々な成長形式に適合させることが可能なため、経験的な立場から成長現象を解析していく手段として幅広く用いられるようになった。わが国の林学界においても、大隅<sup>21)</sup>がRichards関数を紹介して以来、林木の様々な部位の成長に当てはめて解析が行われている<sup>1, 10, 11, 17)</sup>。

ところで、樹木の呼吸は動物、草木植物などほかの生物とは著しく異なる点がある。

樹木の非同化器官は、枝、幹、根が量的に大部分を占める。これらの部位の内部組織は木化、心材化によって、呼吸速度が著しく低くなっている。それゆえ、単位重量当りの呼吸速度は、直径が太くなるほど急速に下がる。呼吸速度を単位表面積当りで表すと、直径による変化は余りなくなるか、または直径とともに、いくらかふえる。これは、呼吸の盛んな形成層の量が、樹皮表面積にある程度、比例するためである<sup>7)</sup>。

これまでに述べたヒルミ、von Bertalanffy、Richards のモデルはいずれも呼吸速度が生物の体重または体積に比例することを仮定してたてられたモデルである。したがって、これらのモデルでは、他の生物と異なる木本植物の呼吸の特性が考慮されていないと言える。

これに対して、梶原<sup>12)</sup>は、同化、呼吸がそれぞれ陽樹冠表面積、樹幹表面積に比例するモデルを提案した。

すなわち、単木を樹冠、樹幹、根の3つに区分し、各部の呼吸量、成長量および同化量を以下のように仮定する。同化は樹冠だけで行われ、樹冠部の同化量、呼吸量、成長量はすべて陽樹冠表面積に比例するとする。ここで、陽樹冠とは、隣接木の樹冠と接触する位置より上の十分に陽光を受ける部分である。根量は陽樹冠表面積と相関が高い<sup>17)</sup>とされているので、根の呼吸量、成長量も陽樹冠表面積に比例するとする。樹幹の呼吸量は樹幹表面積に比例するとし、単木成長量を  $\Delta v_s$  とおく。

樹幹成長量以外の要素は陽樹冠表面積または樹幹表面積で表され、エネルギー収支の等式が導かれる。

$$\Delta v_s = pS_{c(A)} - qS_s \quad (8)$$

ここで、 $p, q$ : パラメータ、 $S_{c(A)}$ : 単木陽樹表面積、 $S_s$ : 単木樹幹表面積

この考え方は、単木の集合体である林分においても同じように成立し、林分の陽樹冠表面積を  $S_{c(A)}$ 、樹幹表面積を  $S_s$  とすると、林分の幹材積成長  $\Delta V_s$  は次式で与えられる。

$$\Delta V_s = PS_{c(A)} - QS_s \quad (9)$$

ここで、 $P, Q$ : パラメータ

式(8)と式(9)では、結果的に陽樹冠表面積に比例する同化量と樹幹表面積に比例する呼吸量の差の形で幹材積成長量が与えられている。梶原はこのモデルにスギ人工林の林分材積成長量、陽樹冠表面積と樹幹表面積の経年変化のデータを当てはめ、式(9)により推定した結果、林分の陽樹幹表面積は林齢に対しほぼ一定であり。この方法から推定された幹材積成長量の累積和は収穫量表の総収穫量に対して満足すべきものであった。

梶原のモデルでは陽樹冠表面積を、シュピーゲルレラスコープによって直接計測して求めている。しかし、通常の経営ではこのような計測は行われない。同化量の項に陽樹冠表面積の代わりに胸高直径、または胸高直径と樹高により表される項を導入できればこのモデルを一般の人工林の成長予測に当てはめることができる。

## 2. 林分シミュレーションに対する成長モデル

林業経営に対し従来よりも精密な将来予測による計画の可能性を与えるために、コンピュータを導入し、林分シミュレーションに対する成長モデルの研究を行うことは、今日世界的に森林計測部門の重要な課題となってきた<sup>14)</sup>。

林分シミュレーションに対する成長モデルは次の3つの型が考えられる。

(A) 単木距離従属型モデル: 立木位置図を用い、隣接木との競争を計算する。非常に精密な成長予測の可能性がある反面、競争効果の生物的測定の困難さ、立木位置図の作成、記録の大量貯蔵の必要性が難点である。これらの例としては、小林<sup>16)</sup>、猪瀬<sup>9)</sup>などがある。

(B) 単木距離独立モデル型: 単木間の距離を考えず、単木の大きさ(直径など)の関数として成長を計算するものである。このモデルは数学的なモデルの作り方により単純なものから複雑なものまで非常に異なる。論理的に導かれる分析的モデルと経験的に導かれる実験的モデルに大きく分類することができる。立木位置図が不要であり、任意の直径・樹高分布に対する成長モデルの設定が可能であるなどの特徴を持つが、単木の予測精度に限界があり、その積み上げとしての林分予測にも誤差を生じやすい欠点がある。この例としては阿部<sup>2)</sup>などがある。

(C) 林分としての距離独立モデル型: 林分全体としての成長を論じ、個々の単木についての予測は行わない。平均値レベルで林分の成長を論じる従来の多くの成長論や正常収穫表などがこの型に属する。

(A)は、通常的人工林では獲得しにくいデータを必要とすることから、精緻なモデルであっても現在のところ一般に応用することはむずかしい。また、(C)は、毎木胸高値直径など直接計測されたデータを使用せず林分全体の状態をいくつかの数値に抽象してその変化を予測するのであるが、コンピュータの発達により従来に較べはるかに容易に大量の数値を取扱えるようになった今日では、計測されたデータの取扱いについて再検討が必要であろう。

(B)は、獲得の容易なデータを直接用いて計算する点が特色である。扱うデータが直接意味を持つので論理的にも経験的にもモデルを組みやすい。また、大量のデータを扱えば、個々の木では異なる成長の特徴も林分レベルでは相殺されるであろう。

同一林分内の林木の直径、樹高などに対する生産量の関係式は、(B)のサブモデルと考えられる。

PRODAN<sup>22)</sup>、大隅ら<sup>20)</sup>は同齢単純林における期首直径 $d_x$ と期間成長量 $Z_d$ の間に直線関係

$$Z_d = ad_x + \beta \quad (10)$$

を示す傾向が認められることを見いだした。

田中<sup>26, 27)</sup>は定期直径成長量、定期樹高成長量について11の仮定をたて、直径、樹高成長の確率的モデルを導いた。

また、龍原・箕輪<sup>28)</sup>は期首直径に対する直径成長量に直線を当てはめ、直径成長量が負になる場合を枯死として、直径階別枯損確率を求めた。

### 3. 新たな成長モデル

前節までの概観から、既往の林分または単木の成長モデルはほかの生物の成長モデルを経験的にあてはめたものか、木本植物の呼吸の特殊性を考慮せずに応用したものが多いたということが明らかになった。また、コンピュータの発達にともない、膨大なデータの処理を必要とするためにこれまでは困難であった単木距離独立型の林分成長モデルの構築が容易となったこと、さらにそのようなモデルの中で単木と林分全体の成長を関係づける部分的なモデルが既に数多く得られていることも明らかになった。

そこで単木距離独立の林分成長モデルを新たに構築する。このモデルは成長量が生産量と呼吸

量の差として表され、林分の生産量および呼吸量はそれぞれ単木の生産量、呼吸量の和として表される。以下にこのモデルを導く。

樹高成長モデルおよび直径成長モデルから林分材積成長モデルを導くために、以下の仮定をおく。

仮定 1. 林木の幹材積、樹幹表面積は樹高および胸高直径で山本-Schumacher 式により表される。樹幹表面積式における独立変数の次数は幹材積式のそれぞれに比べて樹高は等しく胸高直径は 1 次低い。すなわち、

$$V = p H^{\alpha} D^{\beta} \quad (11)$$

$$S = q H^{\alpha'} D^{\beta'} \quad (12)$$

ただし、 $\alpha' = \alpha, \beta' = \beta - 1$

ここで、 $V$ : 幹材積、 $S$ : 樹幹表面積、 $H$ : 樹高、 $D$ : 胸高直径、 $p, q, \alpha, \beta, \alpha', \beta'$ : パラメータ  
山本-Schumacher 式は胸高直径と樹高から材積を求める 2 変数材積式で、わが国の立木材積表もこの式によって調製されている。

つぎに、田中の仮定を参考に、胸高直径および樹高の成長量について、以下の仮定をおく。

仮定 2. ある林分のある林齢における単木の直径成長量は期首直径と直線関係にある。すなわち、

$$\frac{dD}{dt} = aD - b \text{ [cm/年]} \quad (13)$$

ここで、 $a, b$ : 正のパラメータ

仮定 3. ある林分のある林齢における単木の樹高成長量は期首樹高に関わらず一定である。すなわち、

$$\frac{dH}{dt} = k \text{ [m/年]} \quad (14)$$

ここで、 $k$ : 正の定数

仮定 1~3 より、単木の材積成長式が導かれる。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= p \left\{ \alpha H^{\alpha-1} D^{\beta} \frac{dH}{dt} + \beta H^{\alpha} D^{\beta-1} \frac{dD}{dt} \right\} \\ &= p \{ \alpha H^{\alpha-1} D^{\beta} k + \beta H^{\alpha} D^{\beta-1} (aD - b) \} \\ &= p \alpha k H^{\alpha-1} D^{\beta} + \beta a V - \frac{p}{q} \beta b S \end{aligned} \quad (15)$$

仮定 4. 単木の材積成長量、すなわち式 (15) 左辺が負となるときの個体は枯死する。すなわち、

$$D \geq b / \left( a + \frac{\alpha k}{\beta H} \right) \text{ のとき生存}$$

$$D < b / \left( a + \frac{\alpha k}{\beta H} \right) \text{ のとき枯死}$$

仮定 4 の「生存する場合」で、 $D < b/a$  の場合には式 (13) より直径成長量が負となる。このような樹木の成長は現実には見られない。龍原・箕輪<sup>28)</sup>はこの条件を以て個体が枯死するとしたが、実際にはこのような直径の場合でも直径成長量が負にならず生存し続ける個体が多い。また、式

(15) で表される本モデルの材積成長量は正である。そこで、このような直径の場合、材積成長量は式(15)に従うが、直径成長量は0となり、その代わりに樹高成長量が減少すると仮定する。

仮定5. 式(13)で表される直径成長量が負になる場合、実際の直径成長量は0となり、樹高成長量は減少する。すなわち、

$$b / \left( a + \frac{ak}{\beta H} \right) \leq D < b/a \text{ のとき}$$

$$\frac{dD}{dt} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dH}{dt} = k + \frac{\beta H}{aD} (aD - b) \quad (17)$$

ある林分のある林齢における個体の直径および樹高成長を、期首直径ごとに分類すると次のようになる。

(1)  $D \geq b/a$  の場合

$$\frac{dD}{dt} = aD - b$$

$$\frac{dH}{dt} = k$$

(2)  $b / \left( a + \frac{ak}{\beta H} \right) \leq D < b/a$  の場合

$$\frac{dD}{dt} = 0$$

$$\frac{dH}{dt} = k + \frac{\beta H}{\beta H} (aD - b)$$

(3)  $D < b / \left( a + \frac{ak}{\beta H} \right)$  の場合

枯死

(1) は直径、樹高ともに成長する段階、(2) は直径成長は停止するが生存している段階、(3) は枯死の段階を示すものである。これらの成長の概念を図-1 に示す。今後、(1) と(2) の直径成長量を表す式を合わせて「直径成長式」と呼ぶ、同様に樹高の成長を表す式を合わせて「樹高成長式」と呼ぶ。

最後に、ある林分全体の材積成長量について検討する。単木の材積成長式(15)の林分の総和をとることにより林分全体の材積成長式が得られる。すなわち、

$$\Sigma \frac{dV}{dt} = pak \Sigma H^{q-1} D^p + \beta a \Sigma V - \frac{p}{q} \beta b \Sigma S \quad (18)$$

ここで、 $\Sigma$  は林分全体の総和を表す。

式(18)の左辺は式(9)と同じく林分全体の材積成長量を表す。そこで、式(18)と(9)を結びと次のようになる。なお、式(9)の  $S_0$  は式(18)  $\Sigma S$  と同じく樹幹表面積の林分合計を表しているのでここでは  $\Sigma S$  とおく。

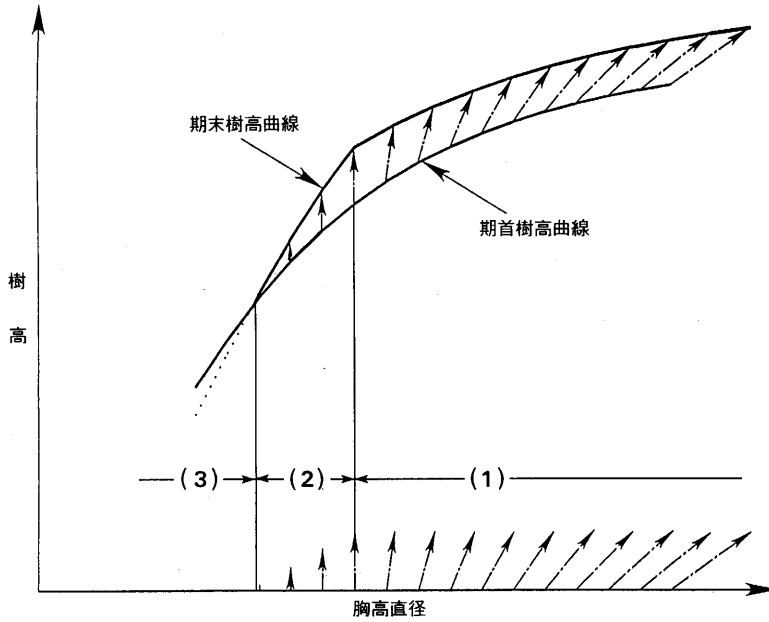


図-1 胸高直径と成長の概念

矢印は各直径の立木の期間内の成長の軌跡を示す。(1)直径、樹高ともに成長する段階、(2)直径成長は停止するが、生存している段階、(3)枯死の段階。

Fig. 1. A conceptual diagram of DBH and height growth for individual trees in a term.

Each arrow represents the locus of the growth of a tree; (1) Both DBH and height increase, (2) Only height increase, (3) the tree dies.

$$\{PS_{C(A)} - (pak \sum H^{a-1} D^b + \beta a \sum V)\} - \left\{Q - \frac{p}{q} \beta b\right\} \sum S = 0 \quad (19)$$

$S_{C(A)}$ ,  $\sum H^{a-1} D^b$ ,  $\sum V$  はそれぞれ  $\sum S$  の項を含まないので  $\sum S$  が変化するとき式(19)が恒等的に成り立つための必要十分条件は次の通りである。

$$PS_{C(A)} - (pak \sum H^{a-1} D^b + \beta a \sum V) = 0 \quad (20)$$

$$Q - \frac{p}{q} \beta b = 0 \quad (21)$$

すなわち、式(15)の第1項と第2項の和および第3項はそれぞれ式(9)の第1項および第2項と同値であると見なす事ができる。

ところで、式(9)の第1項には陽樹冠表面積に比例するとされる樹冠部の同化量、呼吸量、成長量、根部の呼吸量、成長量が含まれている。エネルギー収支の点から、閉鎖後の林分の同化量は一定であるとヒルミ<sup>13)</sup>は仮定した。ここでもし、閉鎖後の林分では同化量が一定となるとともに、樹冠部と根部の成長量は0となり、呼吸量は一定となると仮定するならば、式(9)の右辺第1項、即ち式(19)の右辺第1項と第2項の和は一定となる。

そこで、式(18)の左辺を「林分材積成長量」、右辺第1項と第2項の和を「林分材積生産量」、第3項を「林分材積呼吸量」として、以下の仮定をおく。

仮定6. 林分材積生産量は閉鎖した林分では林齢に関わらず一定となる。すなわち、

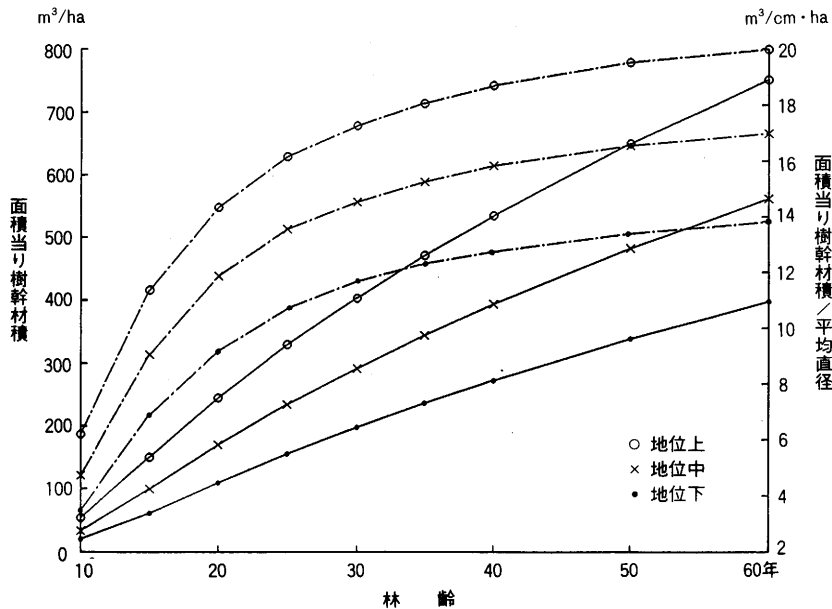


図-2 林分の樹幹材積の成長 (林分収穫表<sup>8)</sup>より)

実線は面積当り樹幹材積を、一点鎖線は面積当り樹幹材積/平均直径を示す。

Fig. 2. Growth of stand stem volume (from the stand yield table<sup>8)</sup>)

solid line; stem volume per hectare, chain line; stem volume per hectare divided by average diameter.

$$\frac{\sum(pakH^{\alpha-1}D^{\beta} + \beta aV)}{SQ} = A = \text{const.} \quad [\text{m}^3/\text{年}/\text{ha}] \quad (22)$$

ここで、SQ: 林分面積, A: ha 当たり樹幹年生産量

このとき、林分材積生産量は林分材積成長量と林分材積呼吸量の和としても表すことができる。すなわち、式(18)より、

$$\sum \frac{dV}{dt} / SQ + \frac{p}{q} \beta b \sum S / SQ = A = \text{const.} \quad (23)$$

これより林分材積成長量は以下のように表される。

$$\sum \frac{dV}{dt} = A \cdot SQ - \frac{p}{q} \beta b \sum S \quad (24)$$

一定の林分の生産量から林分の呼吸量を引いて林分の材積成長量を求めるという点でヒルミの式(2)と共通であるが、呼吸量が樹幹表面積に比例するという点が大きく異なる。この条件のもとでは、林分の樹幹表面積は一定の限界値に近づきつつ、枯死木の材積も含めた林分材積は常に増大し続ける。いわば、最終樹幹表面積一定というべきことである。自己間引にきよる個体数の減少により、生存木は単位材積当りの樹幹表面積を減少して成長し続けることができるのである。このような傾向は、仮定1のもとで、すなわち材積を直径で割ったものは表面積に比例するとして、収穫表<sup>8)</sup>によっても確認することができる(図-2)。



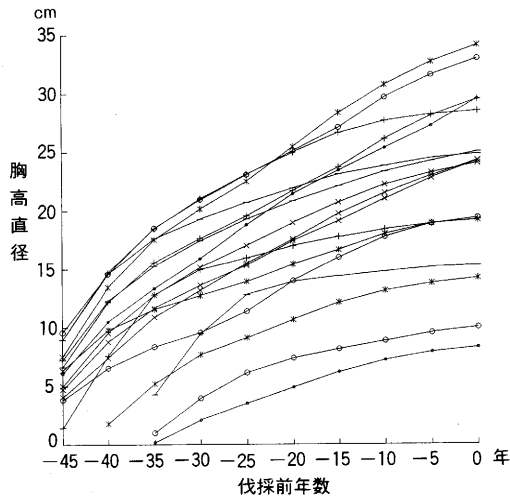


図-3(1) 樹幹解析木の成長過程—胸高直径.

Fig. 3(1). Growing process of stem-analyzed trees—DBH.

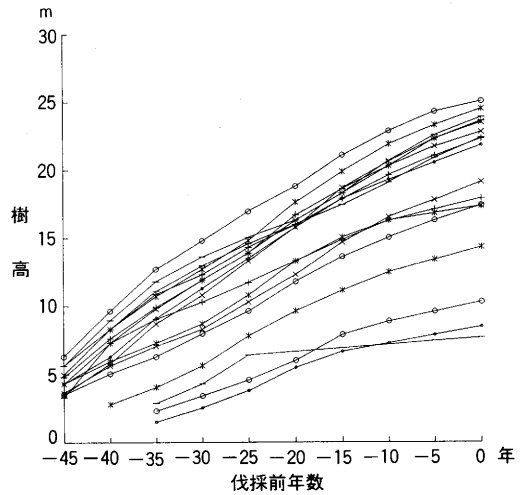


図-3(2) 樹幹解析木の成長過程—樹高.

Fig. 3(2). Growing process of stem-analyzed trees—Height.

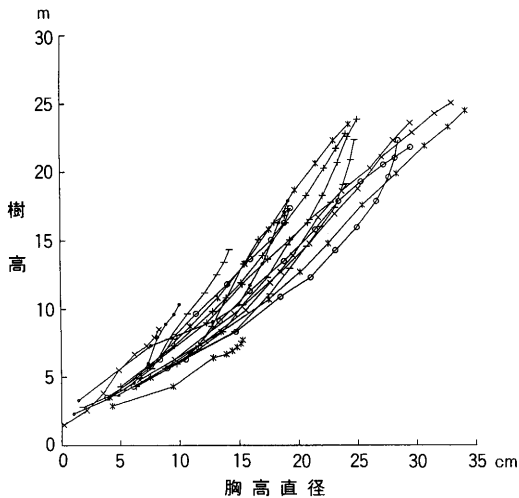


図-3(3) 樹幹解析木の成長過程—D-H トラジェクトリ.

Fig. 3(3). Growing process of stem-analyzed trees—D-H trajectory.

## II. 資 料

本論文の解析では秩父演習林における樹幹解析資料<sup>4)</sup>および秩父演習林における間伐試験地直径成長資料<sup>29)</sup>を用いた。秩父演習林は温帯林業を研究対象として埼玉県西部の秩父郡大滝村に設定された演習林である。

樹幹解析資料は、昭和43年に林解析を目的に伐採された1林班の15のスギ計17本を解析した。林齢は55年生、伐採時の林分密度などは不明、樹幹解析木の平均直径は22.8 cm、平均樹高は19.0 mである。図-3に樹幹解析木の成長過程を示す。

成長試験地は標高1000 m前後の高冷地に植栽された人工造林地の間伐試験地として設定されたもので、間伐区と無間伐比較区が設けられている。3~15年の間隔で、毎木の胸高直径が計測されている。

樹高はいくつかの試験地で標準木調査が行われているが、直径資料に比べ、測定回数が少ない。

本研究のモデルの当てはめには、間伐区、無間伐区から9カ所の試験地の胸高直径資料を用いた(表-1)。樹高資料については、延べ測定回数が少ないことと、試験地間で樹高成長の過程に大きな違いがなかったことから、資料<sup>29)</sup>スギの試験地のすべての資料を用いた。無間伐区は試験地

表-1 試験地の概要

Table 1. History of experimental plots

試験地名	0190	0250	0270	032D	032E
面積 (ha)	0.099	0.036	0.070	0.071	0.083
植栽年	1955	1943	1939	1930	1930
施業方法				無間伐	間伐
観測回数	3	4	4	8	8
最近の観測年月	1986/12	1986/10	1986/10	1989/10	1989/10
最近の本数密度 (本/ha)	1461	1939	1412	1338	1191

試験地名	045A	045B	048A	048B
面積 (ha)	0.095	0.104	0.123	0.102
植栽年	1923	1923	1929	1929
施業方法	無間伐	間伐	無間伐	間伐
観測回数	4	4	4	4
最近の観測年月	1986/10	1986/10	1986/10	1986/10
最近の本数密度 (本/ha)	1243	1026	1410	1256

注: 施業欄空欄は資料に記載無し。

設定以降は伐採が入っていないが、設定以前には保育伐として伐採されている可能性はある。

これらのうち、胸高直径資料を用いた試験地の諸元を表-1 に示す。

### III. 資料の解析

#### 1. 材積式の検討

成長試験地のスギの幹材積および樹幹表面積を胸高直径および樹高データから求めるため、秩父演習林における樹幹解析資料<sup>4)</sup>のうちスギ (試験地番号 003S) の資料を用いて材積式を求めた。まず、各資料木の各齢階毎に幹曲線式に当てはめ、次にその回転体として表される樹幹の体積、表面積を材積式に当てはめ、それぞれのパラメータを推定した。

幹曲線式は次の5次式を用いた。

$$y = ax + bx^2 + cx^3 + dx^4 + ex^5 \quad (25)$$

ここで、 $x$ : 梢端からの距離、 $y$ : 直径、 $a, b, c, d, e$ : パラメータ

5次式はKunze式、3次式(吉田式)に比べ樹幹形への当てはまりが良好である<sup>30)</sup>。5次式の5個のパラメータを推定するためには最低5個のデータを必要とするので、各資料木の測定した断面の数が5個以上となる齢階、すなわち樹高が5.3 mを超えた齢階以降を対象とし、最小二乗法によって幹曲線式に当てはめた。

幹材積および幹表面積は、X軸を回転軸とした幹曲線の回転体の体積および表面積としてそれぞれ式(3.2)、式(3.3)のように表される。

$$V = \frac{\pi}{4} \int_0^H y^2 dx \quad (26)$$

$$S = \pi \int_0^H \left( 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right) y dx \quad (27)$$

ここで、 $V$ : 幹材積,  $S$ : 樹幹表面積,  $H$ : 樹高,  $\pi$ : 円周率

$y$  と  $x$  の 5 次式であるため式 (27) は解析的には解けず、表面積  $S$  は区分積法で求めることとなり煩雑である。しかし、スギの樹幹は  $x$  方向に非常に細長いので  $dy/dx$  は非常に小さい。そこで、 $dy/dx=0$  として式 (27) の代わりに次式を用いて解析的に表面積を求めた。

$$S = \pi \int_0^H y dx \quad (28)$$

実際にこの樹幹解析資料のうちから大中小 3 本の資料木を選び、5 年生おきに式 (27) および式 (28) で求めた表面積を比較したところ、最大で約 0.1%、樹高 10 m 以上の場合にはほぼ 0.03% 以下の差であったことから、式 (28) による近似は問題ないと考えられる。

樹幹材積式および樹幹表面積式は仮定 1 の通り山本-Schumacher 式を用いた (式 (13), (14))。

式 (26), 式 (28) により求められた各資料木の各齢階における樹幹材積、樹幹表面積に対数軸上での最小二乗法を適用し、林齢毎、および各齢階を取りまとめて式 (13), 式 (14) のパラメータを推定した。

林齢毎のパラメータを図-4 に、45 年から 55 年生までおよび 15 年生から 55 年生までの資料を取りまとめて推定したパラメータを表-2 に示す。また、試験地番号 001S のいくつかの資料について 5 次式から求められた樹幹材積と、003S から求めた材積式および関東地方材積表<sup>24)</sup> より求まる材積とを比較したのが図-5 である。

樹幹材積式、樹幹表面積式ともに林齢 30 年頃以降で各パラメータが安定し、 $\alpha$  および  $\alpha'$  は約 1.1,  $\beta$  は 1.8,  $\beta'$  は 0.9 程度となっている。林齢 30 年よりも以前では、林齢により多少ばらつきがあるものの、 $\alpha$  および  $\beta$  はそれぞれ上記の値の周りに分布していると見なせる。このことから、材積式および表面積式のパラメータは林齢、樹高、胸高直径などによらず一定で林分に固有な値であり、材積は樹高と胸高断面積の積に、表面積は樹高と胸高直径の積にそれぞれほぼ比例するといえる。このことは、 $\alpha' = \alpha, \beta' = \beta - 1$  という I 章の仮定 1 が正しいことを示している。

通常、材積表では直径階により材積式のパラメータが異なる場合が多い。しかし、本論文では 1) この資料の範囲の限りほぼ一定と見なすことができること、2) 上記の通り求められたパラメータが樹幹表面積式における独立変数の次数は樹幹材積式のそれぞれに較べて胸高直径が 1 次低いという仮定をほぼ満たしていること、3) 直径階によるパラメータの変動はモデルの簡明化を妨げることから、全直径階でパラメータを一定とする。また、わずかな資料木から求められた材積式を演習林全体の林木に当てはめる点についても同様の理由から適当であるとする。

以上の理由により今後、樹幹材積式、樹幹表面積式のパラメータ  $p, q, \alpha, \beta$  は表-2 の 15~55 年生の調料から得られた値を、 $\alpha', \beta'$  はそれぞれ  $\alpha' = \alpha, \beta' = \beta - 1$  を用いる。

## 2. 期間計算について

各成長試験地の測定時は、その年月まで記録されている。しかし、測定間隔は一定ではなくその季節もまちまちである。したがって、以下の解析で 2 時点の観測値から成長量を算定する際に、1 年当りの量に換算しなければならない。本論文では、季節による成長速度の違いにも考慮して、以下のような補正を加えた年数を算出し、これをもって 2 時点間の観測間隔とした。

すなわち、成長は 3 月から 11 月までの 9 カ月間に一様に行われ 12 月、1 月、2 月の 3 カ月間には停止すると仮定し、成長する期間の月を足し合わせて 9 を割ったものを 2 時点間の年数であ

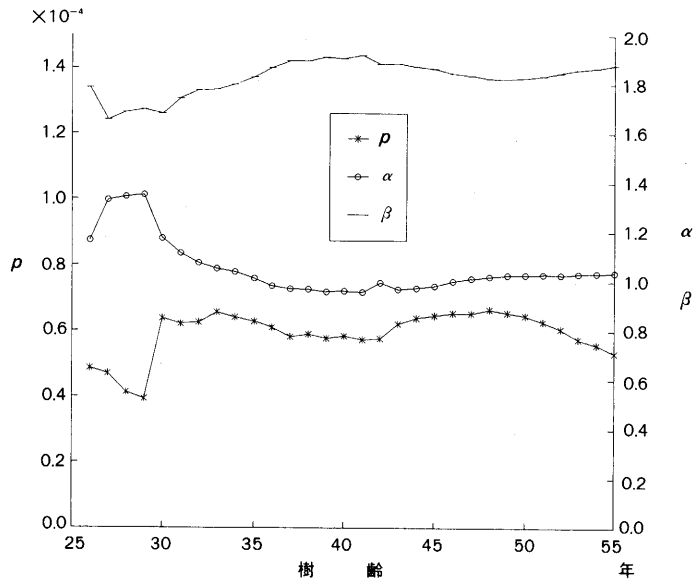


図-4(1) 樹幹材積式パラメータの林齢による変化.

Fig. 4(1). Change in parameters of stem volume equation with stand age.

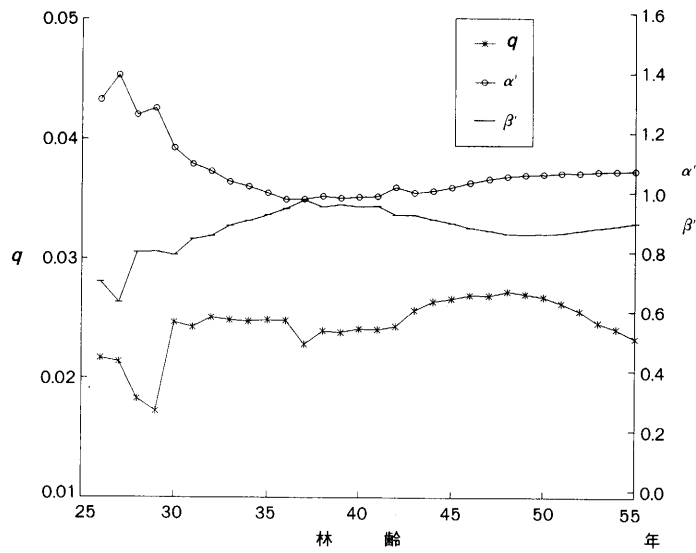


図-4(2) 樹幹表面積式パラメータの林齢による変化.

Fig. 4(2). Change in parameters of stem surface equation with stand age.

表-2 樹幹材積式、樹幹表面積式のパラメータ

Table 2. Calculated parameters of tree stem volume equation and tree stem surface equations

林 齢	$p$	$q$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha'$	$\beta'$
45-55	$6.168 \times 10^{-5}$	$2.589 \times 10^{-2}$	1.021	1.845	1.056	0.875
15-55	$5.700 \times 10^{-5}$	$2.273 \times 10^{-2}$	1.087	1.801	1.123	0.847

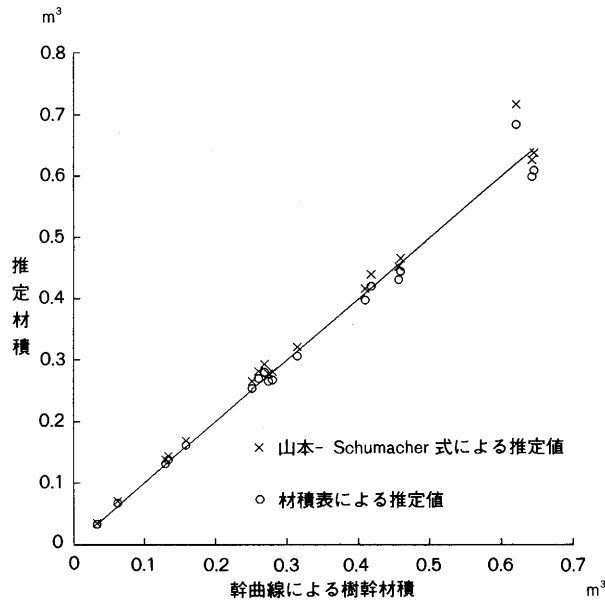


図-5 幹曲線、山本-Schumacher式、材積表による材積の比較.

Fig. 5. Comparison among estimated stem volumes based on stem curve, Yamamoto-Schumacher equation and volume table.

るとした。また、期首あるいは期末の月が成長する月である場合はそれぞれ0.5カ月を加算した。

例えば、1979年4月から1985年6月までの期間は次のように算出される。

1979年の成長月数=7.5カ月

1985年の成長月数=3.5カ月

1984~84年の年数=5カ年

期間=5+(7.5+3.5)/9=6.2(年)

### 3. 樹高成長および地位の検討

各試験地の樹高標準木による樹高データから、樹高曲線を定めた。樹高曲線式には式(29)を用いた。式(29)は胸高断面積 $\pi/4 \cdot D^2$ の変化率に対する樹高 $H$ の変化率の比が最大樹高 $H_*$ に近づくにつれ0に近づくという仮定のもとに式(30)より導かれる。樹高曲線から各資料の毎木のデータに樹高を当てはめた。本論文においては、優勢木の樹高成長は胸高直径に関わらず一定で

表-3 樹高曲線のパラメーターと平均樹高

Table 3. Calculated parameters of height-diameter curves and the corresponding mean heights for each plot

試験地名	林齢	$H_*$	$a^*$	平均樹高 (m)
0020	68	29.1868	6.50039	26.4653
	73	30.0691	7.69003	26.9319
003A	73	35.1544	5.47571	31.8912
003B	68	34.5384	6.72982	30.6523
	73	34.7431	2.90930	33.0367
005A	55	27.1765	2.62804	25.4835
005B	55	30.6060	5.88036	25.4687
0080	73	37.3166	15.00910	31.7805
0090	42	27.1975	5.38936	23.9425
	67	29.9817	4.39189	27.8371
	72	30.8547	4.84817	28.5410
0190	26	21.5433	5.76103	18.0836
	31	23.0133	4.59275	20.1675
0250	38	29.5278	7.68508	21.7573
	43	31.0908	6.40493	24.4765
0270	42	33.6510	11.32360	22.3846
	47	30.1799	8.66296	23.1938
0290	43	29.5477	9.71544	22.9975
	48	30.6394	7.58382	25.2999
032D	26	26.3539	7.68053	20.4786
	49	34.6450	7.27352	28.5473
	54	33.4749	6.38251	28.7841
	59	31.8091	4.28131	29.0634
032E	26	26.5590	7.29795	20.0589
	49	34.2779	6.00097	29.0635
	54	37.8426	8.70385	30.1253
	59	36.1165	7.09215	30.5461
0380	58	36.3085	9.22769	29.9541
0390	58	29.1067	2.01145	27.9269
045A	58	35.1447	6.23659	29.9555
	63	38.1022	6.27435	32.3235
045B	58	32.4775	7.20275	27.8824
	63	33.8791	6.90814	29.4435
048A	52	42.4167	15.84380	26.7048
	57	32.1775	5.10863	28.3952
048B	52	32.8286	9.44755	26.1920
	57	31.5897	4.98504	28.1734
503A	48	34.8159	6.19700	29.5993
	54	32.7220	5.39523	29.0221
503B	59	31.3475	3.64895	29.1568
	48	32.2641	5.09987	28.8168
	54	31.9503	6.08246	28.3295
503C	59	33.9842	6.62026	29.9222
	48	34.6339	5.60070	30.3422
	54	32.2217	5.06278	29.1384
	59	30.5182	3.67366	28.6027

\* 樹高曲線式  $\frac{1}{H-1.3} = \frac{1}{H_*-1.3} + \frac{a}{D^2}$  のパラメータ  $H_*$ ,  $a$ .

表-4 最大樹高と地位指数

Table 4. Maximum height and site index for each plot

試験地名	最大樹高 $M^*$	地位指数 SI
0020	29.4854	21.1239
003A	32.1438	23.0284
003B	35.1780	25.2022
005A	30.5144	21.8611
005B	30.4967	21.8484
0080	34.7708	24.9104
0090	31.5697	22.6171
0190	33.6128	24.0808
0250	32.1174	23.0095
0270	30.0548	21.5318
0290	31.5182	22.5802
032D	35.2557	25.2578
032E	36.3568	26.0467
0380	35.1542	25.1851
0390	32.7751	23.4807
045A	36.0404	25.8200
045B	33.1690	23.7629
048A	33.1430	23.7443
048B	32.7045	23.4301
503A	35.4288	25.3819
503B	35.1672	25.1944
503C	35.5299	25.4543

\* 樹高成長曲線式  $H = M(1 - 1.20e^{-0.0362H})$  のパラメータ  $M$ .

あると仮定しているので、平均胸高直径以上の胸高直径を持つ林木の平均をもってその資料の平均樹高とした。樹高曲線式のパラメータおよび平均樹高を表-3 に示した。

$$\frac{1}{H-1.3} = \frac{1}{H_*-1.3} + \frac{a}{D^2} \quad (29)$$

$$\frac{D}{H} \cdot \frac{dH}{dD} = \frac{2}{H_*} (H_* - H) \quad (30)$$

ここで、 $a$ : パラメータ

成長試験地の地位を検討するために、林分収穫表<sup>9)</sup>と各試験地の平均樹高成長の比較を行った。林分収穫表は北関東・阿武隈地方のものを用いた。これにより、成長試験地はほとんど地位上に分類され、近隣の平均的な人工林に比べ非常に地位のよいことがわかる。個々の試験地の樹高デー

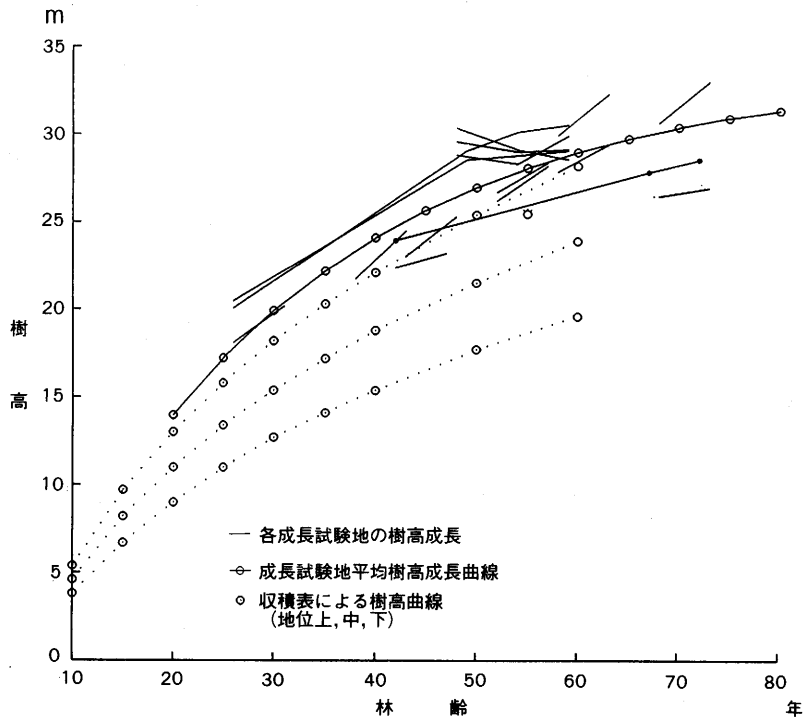


図-6 スギ成長試験地の樹高成長.

Fig. 6. Height growth for the Sugi plots.

タは少ないので、まず全ての試験地の平均樹高を Mitscherlich 式 ( $H=M(1-L \cdot e^{-lt})$ ,  $M$ ,  $L$ ,  $l$  はパラメータ) に当てはめ、これを成長試験地の平均樹高成長曲線式とした。パラメータの推定法は GLASS<sup>6)</sup> によった。平均樹高成長曲線式を Mitscherlich 式にあてはめた結果は次の通りである。

$$H=33.6(1-1.20e^{-0.0362t}) \quad (31)$$

ここで、 $t$ : 林齢

次に、平均樹高曲線式の最大値パラメータ ( $M$ ) を変化させることにより個々の試験地に樹高成長曲線式を当てはめ、その試験地の樹高成長曲線式とした。また、その樹高成長曲線式の示す 40 年生における樹高を以て地位指数とした。各試験地の地位指数を表-4 に示す。また、収穫表と平均樹高成長曲線、各試験地の関係を図-6 に示した。

#### 4. 直径成長の検討

移動平均法により直径に対する直径成長の傾向を観察した。移動平均法は隣接するいくつかのデータを平均していくことにより個々のデータの特徴や測定誤差などを相殺するため、データ全体の傾向を把握するのに便利である。ここでは、ある林齢における毎木の胸高直径データを大きさの順に並べ替え、大きさの連続する 20 本毎ずつの期首胸高直径と胸高直径の連年成長量の平均値をそれぞれ計算し、図上にプロットした。これらを直径成長量曲線と呼ぶことにする。直径成長曲線を図-7 に示す。

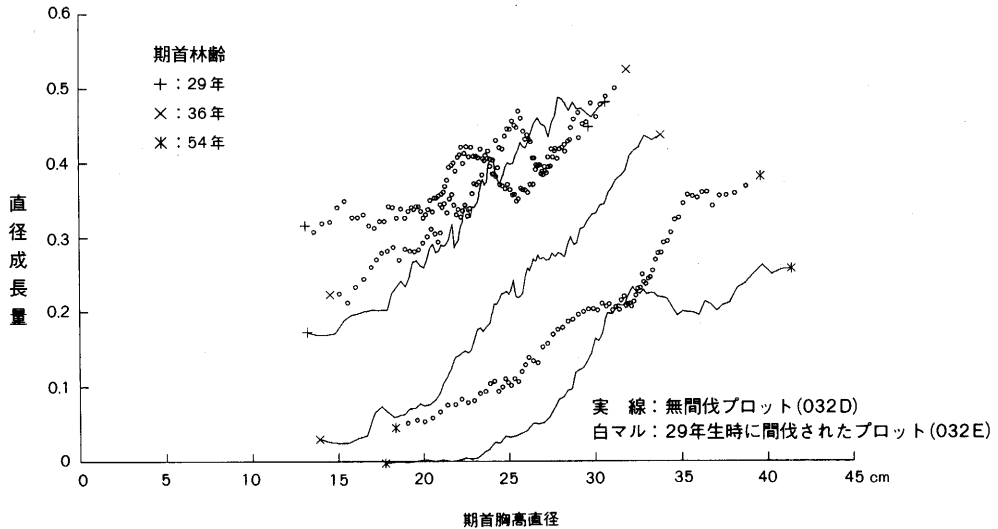


図-7 移動平均法による直径成長量曲線.

Fig. 7. Smoothed DBH increment curves.

この図から、直径成長について以下の点が観察された。

- 1) 直径成長量曲線は、概ね右上がりの直線と見なしてよい。
- 2) しかし、中程がこぶのように盛り上がる曲線もある。すなわち、直径成長量曲線がある直径より立ち上がり、中位の直径からその傾きを緩め、あるいは一旦直径成長量が低下してから緩やかに上昇するような形である。

3) 傾きは林齢とともに小さくなっている。

4) 間伐林では間伐直後、小径木が一樣な直径成長量を示し、直径成長量が0となる胸高直径が無い。これは時間とともに、再びある直径以下では直径成長量がほぼ0となる直径量曲線に変化する。また、大量に枯損木の発生した直後においてもこの傾向がみられた。

2) の理由は不明である。4) は直径成長に対する間伐効果の表れであろう。このような資料に対して仮定2を当てはめることは不適當である。しかし、逆に間伐から時間が経過し、4) の傾向を示さなくなった間伐林分は無間伐林分と同等に扱うことができよう。以上の観察により、間伐直後などの林分を除いて仮定2は適當である。

直径成長のパラメータの推定は、各試験地の連続した2時点の直径毎木データを用い、最小二乗法による方法で行った。

直径成長式は  $dD/dt=0$  ( $D < b/a$ ) と、 $dD/dt=aD-b$  ( $D \geq b/a$ ) の不連続な2直線よりなるので、通常最小二乗法は適用できない。ここでは、2直線の交点の座標  $b/a$  を0.1 cm 刻みでデータの最大直径から0まで移動させ、そのそれぞれについて傾き  $a$  を最小二乗法によって求めてから、それらの  $a, b/a$  の組の中で最も残差平方和の少ない組を選び、 $a, b$  をそれぞれ決定した。

こうして求められた  $a, b$  は2節の修正期間を用い以下の計算によりそれぞれ1年間当たりの値に換算した。

2時点の間隔が  $n$  年の場合のパラメータ  $a, b$  を、年当りになおしたときの値をそれぞれ  $a', b'$



表-5 直径成長式のパラメータ

Table 5. Parameters of the DBH increment equations

試験地名 観測期間	0270 1981-1986	0190 1981-1986	032D 1979-1984	032D 1984-1989	032E 1979-1984	032E 1984-1989
地位指数 SI	21.5318	24.0808	25.2578	25.2578	26.0467	26.0467
平均林齢年	44.5	28.5	51.5	56.5	51.5	56.5
本数密度 本/ha	1500	1475	1437	1394	1253	1229
材積 m <sup>3</sup> /ha	614.82	459.67	1248.19	1404.38	1095.20	1235.68
樹幹表面積 m <sup>2</sup> /ha	9769.67	8407.93	16193.03	17241.48	14552.97	15372.49
補正材積 m <sup>3</sup> /ha	687.77	459.77	1190.29	1339.24	1012.77	1142.68
補正樹幹表面積 m <sup>2</sup> /ha	10958.91	8409.82	15441.93	16441.75	13457.63	14215.48
<i>a</i>	0.01706	0.02228	0.01809	0.01254	0.01383	0.01460
<i>b</i>	0.1177	0.1225	0.3129	0.2370	0.1556	0.2307
<i>D</i> 切片	6.9	5.5	17.3	18.9	11.3	15.8
<i>k</i>	0.2682	0.5230	0.2009	0.2062	0.2072	0.2127
材積成長量 m <sup>3</sup> /ha/年	23.3792	32.9800	28.9840	24.9964	24.3718	27.7491
材積呼吸量 m <sup>3</sup> /ha/年	5.3848	4.8652	23.9356	18.9075	10.5861	16.4735
材積生産量 <i>A</i> m <sup>3</sup> /ha/年	28.7640	37.8452	52.9196	43.0390	34.9578	44.2226

試験地名 観測期間	045A 1981-1986	045B 1981-1986	048A 1981-1986	048B 1981-1986	0250 1981-1986
地位指数 SI	25.8200	23.7629	23.7443	23.4301	23.0095
平均林齢年	60.5	60.5	54.5	54.5	40.5
本数密度 本/ha	1326	1067	1496	1284	2194
材積 m <sup>3</sup> /ha	1322.66	1102.83	1112.30	1051.81	786.04
樹幹表面積 m <sup>2</sup> /ha	17228.85	13460.04	14667.61	13894.68	14112.79
補正材積 m <sup>3</sup> /ha	1233.85	1117.84	1128.32	1081.27	822.82
補正樹幹表面積 m <sup>2</sup> /ha	16071.98	13643.22	14878.88	14283.80	14773.23
<i>a</i>	0.00998	0.01148	0.00984	0.01164	0.02458
<i>b</i>	0.1348	0.1493	0.1368	0.1897	0.2827
<i>D</i> 切片	13.5	13.0	13.9	16.3	11.5
<i>k</i>	0.1803	0.1660	0.2014	0.1988	0.3313
材積成長量 m <sup>3</sup> /ha/年	22.3909	21.5092	29.2093	32.1558	31.0244
材積呼吸量 m <sup>3</sup> /ha/年	10.6993	9.2816	9.2426	12.1857	18.9000
材積生産量 <i>A</i> m <sup>3</sup> /ha/年	33.0902	30.7908	38.4519	44.3416	49.9244

とおく。このとき、パラメータの間には以下の関係が成り立つ<sup>28)</sup>。

$$a' = (a+1)^{1/n} - 1 \quad (32)$$

$$b' = \frac{a'}{a} b \quad (33)$$

### 5. 林分材積生産量の推定

樹高生長および直径成長が定まったので、式(18)より林分材積成長式が導かれる。ここでは、仮定6により定めた林分材積生産量 *A* を計算する。

*A* は式(22)または式(23)より求められる。ここでは、式(22)から算出した。式(23)の林分材

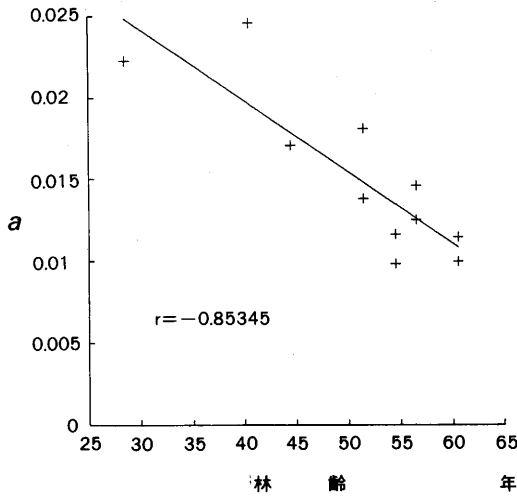


図-8(1) 直径成長パラメータの比較—林齢と  $a$ .

Fig. 8(1). Relationship among parameters of the diameter increment equation—age and parameter  $a$ .

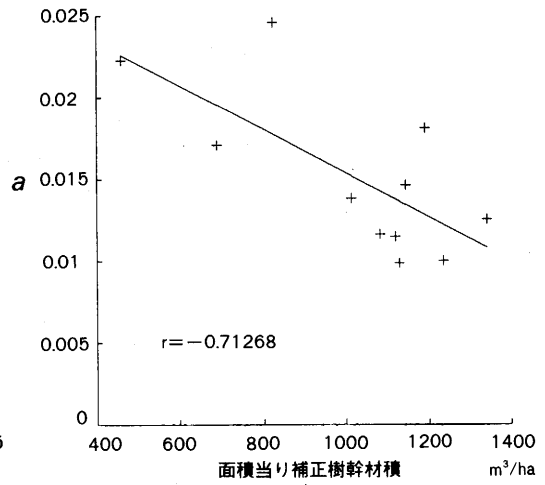


図-8(2) 直径成長式パラメータ間の関係—面積当り補正樹幹材積と  $a$ .

Fig. 8(2). Relationship among parameters of the diameter increment equation—Revised stem volume per unit area and parameter  $a$ .

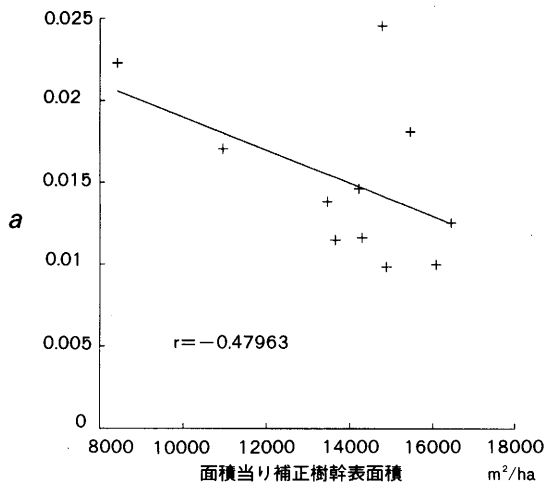


図-8(3) 直径成長式パラメータ間の関係—面積当り補正樹幹表面と  $a$ .

Fig. 8(3). Relationship among parameters of the diameter increment equation—Revised stem surface area per unit area and parameter  $a$ .

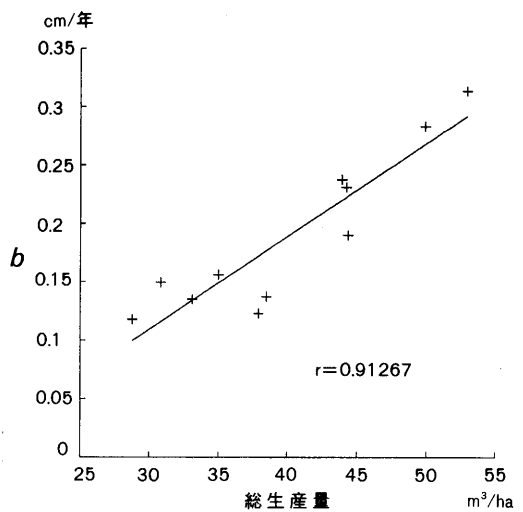


図-8(4) 直径成長式パラメータ間の関係—総生産量と  $b$ .

Fig. 8(4). Relationship among parameters of the diameter increment equation—Gross assimilation and parameter  $b$ .

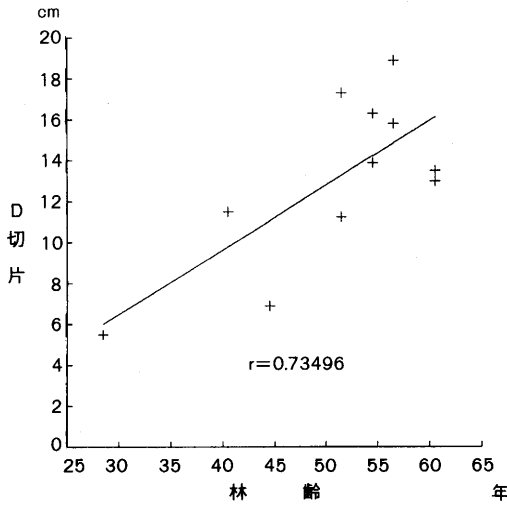


図-8(5) 直径成長式パラメータ間の関係—林齢とD切片.

Fig. 8(5). Relationship among parameters of the diameter increment equation—age and *D*-section.

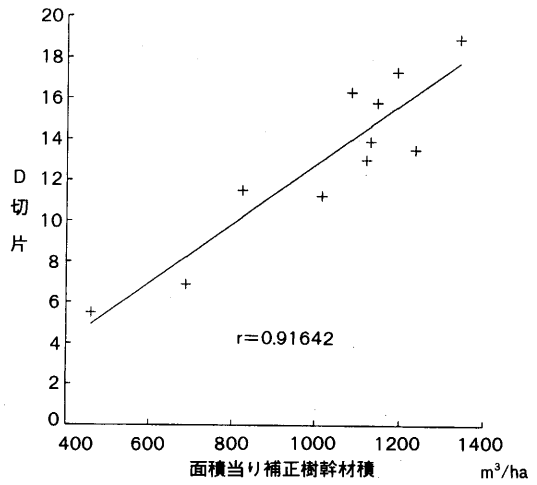


図-8(6) 直径成長式パラメータ間の関係—面積当り補正樹幹材積とD切片.

Fig. 8(6). Relationship among parameters of the diameter increment equation—Revised stem volume per unit area and *D*-section.

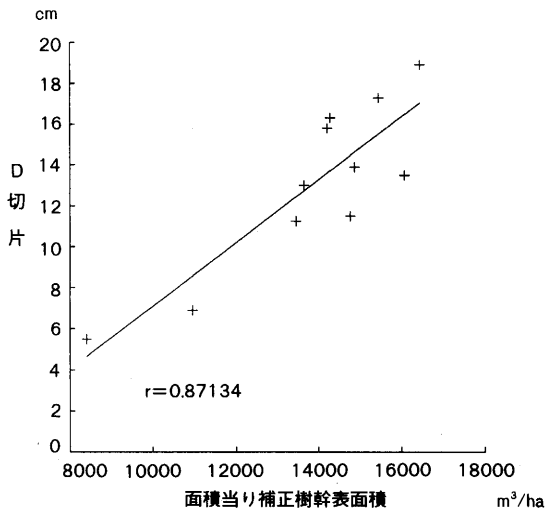


図-8(7) 直径成長式パラメータ間の関係—面積当り補正樹幹表面積とD切片.

Fig. 8(7). Relationship among parameters of the diameter increment equation—Revised stem surface area per unit area and *D*-section.

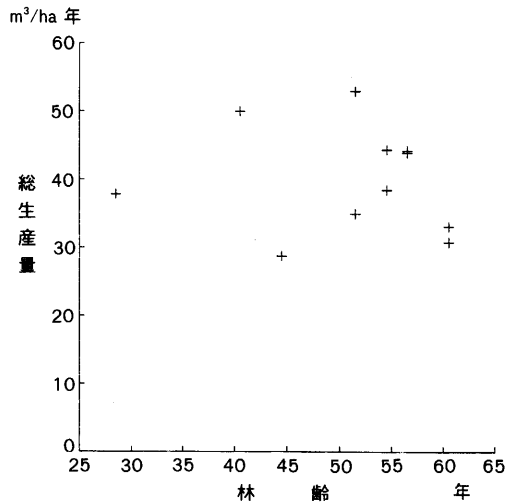


図-8(8) 直径成長式パラメータ間の関係—林齢と総生産量.

Fig. 8(8). Relationship among parameters of the diameter increment equation—age and gross assimilation.

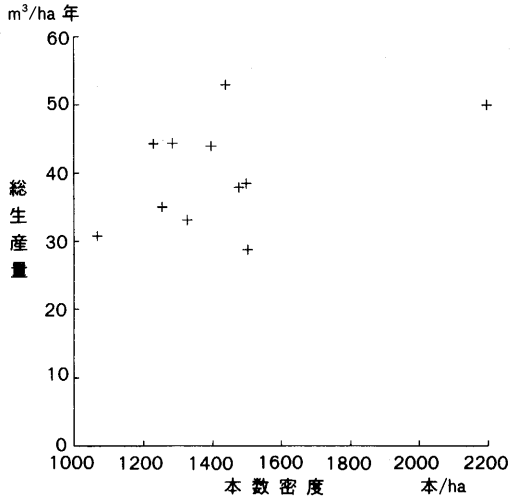


図-8(9) 直径成長式パラメータ間の関係—本数密度と総生産量。

Fig. 8(9). Relationship among parameters of the diameter increment equation—Stem density and gross assimilation.

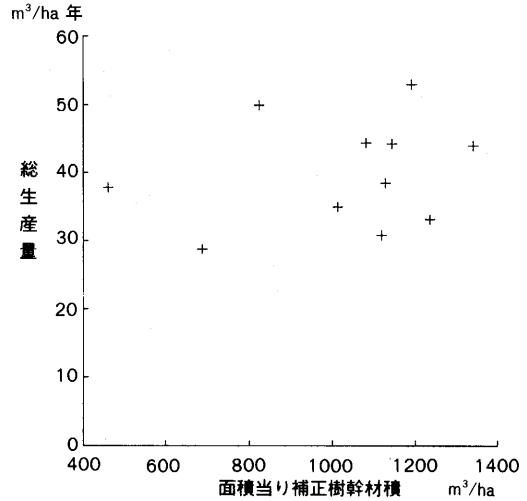


図-8(10) 直径成長式パラメータ間の関係—面積当り補正樹幹材積と総生産量。

Fig. 8(10). Relationship among parameters of the diameter increment equation—Revised stem volume per unit area and gross assimilation.

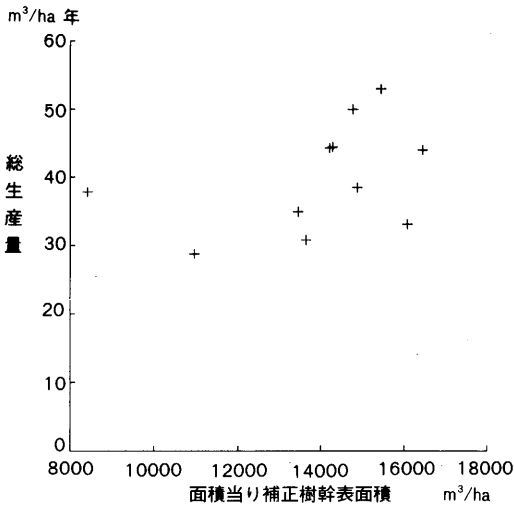


図-8(11) 直径成長式パラメータ間の関係—面積当り補正樹幹表面積と総生産量。

Fig. 8(11). Relationship among parameters of the diameter increment equation—Revised stem surface area per unit area and gross assimilation.

積成長量は期首と期末の林分材積の差ではなく、 $n$  年間に成長して増大する材積なので、期間中に枯死した個体の材積が含まれていることに注意する。なお、期首樹高は各データ毎に求めた樹高曲線によったが、樹高成長量は個々の試験地の期首、期末の樹高データの差ではなく、式(31)の平均樹高成長曲線式から推定した値を用いた。 $A$  は樹高成長量により大きく値が変化するが、これは樹高データの精度が不十分であるためである。

### 6. $a, b$ および $A$ の考察

4 節および 5 節で求めた試験地の成長量、パラメータ  $a, b, A$  などを表-5 に示す。「 $D$  切片」は  $b/a$ 、すなわち直径成長量が 0 となる最大直径である。直径成長式パラメータとほかのパラメータの関係を図-8 に示す。樹幹材積、樹幹表面積をこれらのパラメータと比較する際に地位の影響を除去するために、地位と比較する場合以外では地位に応じた樹高成長曲線式ではなく平均樹高成長曲線式から樹高をもとめ、樹幹材積と樹幹表面積を求

めた。これらは表-5でそれぞれ「補正樹幹材積」, 「補正樹表面積」と表してある。パラメータ間で強い相関を示すと思われるものについては直線回帰を行い, その結果を当該図中に示した。これらの関係から, 以下のことがいえる。

1)  $a$  は林齢と共に減少する。 $a$  は樹幹材積, 樹幹表面積の増大とともに減少する。このことはすでに龍原・箕輪<sup>28)</sup>も指摘している。ここでは, 地位, 本数密度, 林齢などの互いに異なる試験地のデータから確認した。今回用いたデータでは, 特に林齢との相関が高かった (図-8(1), (2), (3))。

2)  $b$  は林分材積生産量  $A$  の増大とともに増大する (図-8(4))。

3)  $D$  切片は樹幹材積, 樹幹表面積の増大とともに増大する。 $D$  切片は林齢とともに増大する。 $a$  と比べて  $D$  切片は樹幹材積, 樹幹表面積により大きな相関を示している。これは, 材積または表面積を大きな木から順に累積して, ある一定値を超えるとそれ以降の木は生存を許さないことを示すものと考えられる (図-8(5), (6), (7))。

4) 林分材積生産量  $A$  は, 林齢, 本数密度, 林分樹幹表面積, 林分材積に対し, 明確な傾向を示さない。

$A$  についての傾向は, 資料数が少ないため, 今後さらなる検討が必要である。

#### IV. 林分材積成長のシミュレーション

I章3節で示した単木距離独立型林分材積成長モデルに, III章で検討したパラメータを当てはめ, 実際に林分の成長のシミュレーションを行う。

このシミュレーションは, まず林齢に関わらず一定であると仮定した林分材積生産量を与える。次に, 予測期間の期首における林分内の各単木の状態から, 林分材積生産量の各単木への配量を決定する。そして, 各単木について呼吸量と分配された生産量から期末の状態 (生死・成長量) を決定する。さらにそれを次の予測期間の期首状態として繰り返し計算を行うものである。

そのフローチャートを図-9に示す。以下, このフローチャートに従い解説する。

##### ①. 初期設定

あらかじめ必要であるのは樹幹材積式と, 樹幹表面式である。ここでは前章で求めたパラメータを用いる。全林分の全林齢, 全直径階に対して共通であるとした。

初期条件として以下のものを与える。

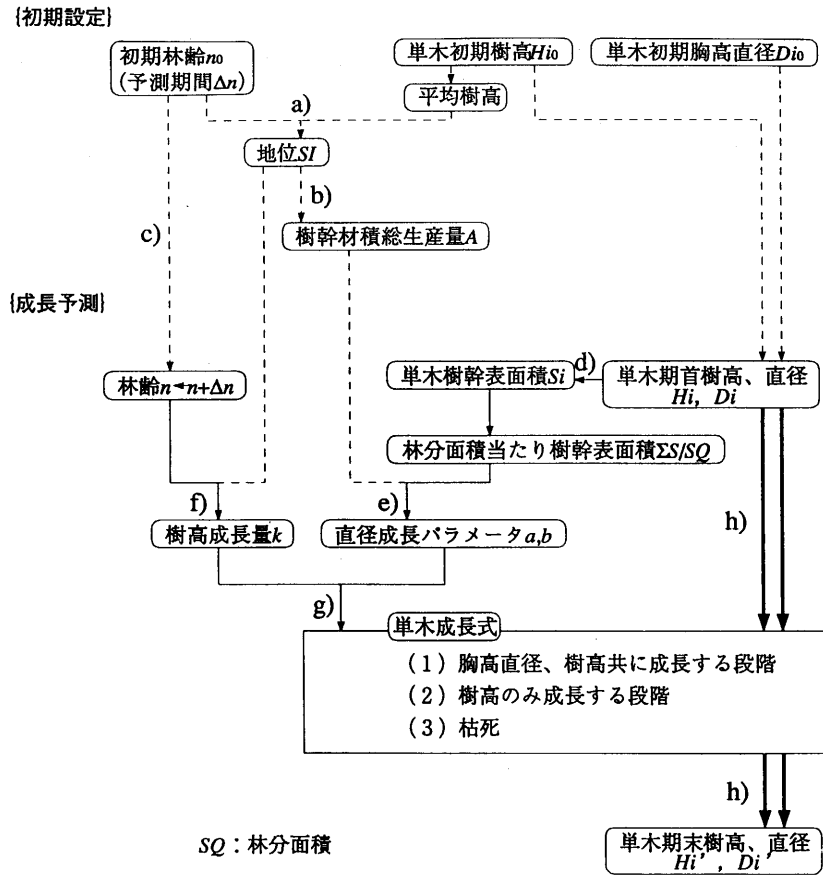
- 林齢  $n_0$
- 予測期間  $\Delta n$
- 林分面積  $SQ$
- 林分内の個体本数  $m$
- 気  $i$  番目の個体の初期胸高直径  $D_{i0}$  ( $1 \leq i \leq m$ )
- 第  $i$  番目の個体の初期樹高  $H_{i0}$  ( $1 \leq i \leq m$ ) (樹高曲線による直径からの推定でもよい)

a) 地位指数  $SI$  の決定: 平均胸高直径以上の胸高直径の個体の初期毎木樹高より平均樹高を求め, 平均樹高成長曲線式 (31) より当該林分の樹高成長曲線ならびに地位を得る。

b) 林分材積生産量  $A$  の決定: 前章までの考察から,  $A$  に明確な傾向を見いだせなかったため, ここではその試験地のデータから, 式 (22) によって算出された値を与える。

##### ②. 林分材積成長予測

林分材積生産量, 期首林齢および幹材積, 樹幹表面積の現存量より, 林分全体の成長予測を行



$SQ$  : 林分面積

図-9 林分成長モデルのフローチャート.

Fig. 9. Flow chart of the stand growth model.

う。

c) 林齢の設定: 第1回目の予測では初期林齢  $n_0$  を用いる。2回目以降は予測期間  $\Delta n$  を前回林齢に加えて新たな林齢  $n$  とする。

d) 期首幹材積, 樹幹表面積の推定: 樹幹材積式, 樹幹表面積式により期首毎木胸高直径, 樹高から毎木幹材積, 樹幹表面積を求める。さらに, それらの総和からヘクタール当りの幹材積, 樹幹表面積を算出する。

e) 直径成長式パラメータ  $a, b$  の推定: 林分材積生産量  $A$  から式 (18) を用いて  $a$  を算出し, さらに図-8(7) で求められた面積当り樹幹表面積と次の  $D$  切片の回帰式より  $D$  切片を求めて  $b$  を算出する。

$$D \text{ 切片} = .0015460 \times \Sigma S - 8.3296 \quad (34)$$

f) 樹高成長量  $k$  の推定: 平均樹高成長曲線 (式 (31)) より, 林齢から算出する。

③. 単木材積成長予測

単木毎に期首胸高直径, 樹高から期間成長を求める。

g) 毎木成長量の算出: 仮定 5. に従い, 直径, 樹高の成長式により, 期首胸高直径, 樹高から, 直径成長量, 樹高成長量を算出する。枯死木はその材積を求める。

h) 期末毎木直径, 樹高の算出: 毎木の直径成長量および樹高成長量をそれぞれの期首データに足し合わせ, 期末の胸高直径, 樹高とする。枯死木のデータは取り除く。

これまでで 1 回の予測が終了する。この段階で, 期末データとして, 次の数値が算出されている。

- 期末本数
- 毎木期末直径
- 毎木期末樹高
- 期間枯死木本数
- 期間枯死木材積

これらの数値をもって期首データとし, 再度計算をする場合は c) から始める。

このモデルを用いて試験地 032D の成長を予測した。

期首データには 1956 年 (26 年生) の毎木直径データおよび樹高曲線式 (式 (29), パラメータは表-3 の当該試験地参照) を与えた。

- $A = 45$  [ $\text{m}^3/\text{ha}/\text{年}$ ]
- $\Delta n = 5$  [年]

とおき, 1991 年までの 7 周期の計算を行った。

その毎木の胸高直径と樹高の林齢 26 年生時の実測値およびそれより計算された 5 年毎の予測値, 比較のために 54 年生, 59 年生時の実測値を表-6 に示す。また, 1956 年実測値, 1991 年予測値, 1989 年実測値の平均値を表-7 に示す。また, 毎木の 1956 年の胸高直径に対する 1991 年予測値および 1989 年実測値を図-10 に, 胸高直径, 樹高, 樹幹表面積, 幹材積それぞれの 1991 年予測値と, 1989 年実測値のヒストグラムを図-11 に示す。ただし, これらの図表中, 樹高の実測値とは, 当該年の胸高直径の実測値から樹高曲線式により算出された樹高の値である。

胸高直径に関して, 予測では期首の順位が保たれたまま成長している。また, ある順位以上の林木はすべて生存し続け, それ以下の林木はすべて枯死している。それに対し実測値では, 概ね予測値と同様の成長の傾向を示しているが, 期末の順位と期首の順位とは大きく異なっている。また, 枯死木は, 期首直径の小さい方ほど出現の頻度が多いが, 必ずしも小さい方から順に枯れてはいない。単木毎の成長の予測が必ずしも正確でないのは, このモデルが単木距離独立型モデルであり, 個々の単木の隣接木との競争状態や生理的な活力を考慮していないからである。したがって, 結果的に予測値のまわりに均一に分布していれば, 林分予測としては問題ない。実測値では予測値よりも大きい個体が枯死している。それによる競争の緩和は予測に比べて常に大きいものであり, 予測値が実際の林分よりも過密で単木の成長を過小評価することになる。その結果の直径階の分布に現れているものと考えられる。このような現象をモデルの中で表現するためには予測のランダムな変動を取扱う確率モデルの導入が必要となろう。

樹高の予測値は, 実測値に比べかなり過大な値となっている。とくに直径の小さい単木では顕著である。これは, 樹高標準木の測定値にかなりの誤差を含むので, 期首の測定値から予測された樹高, 期末の実測値ともに誤差を含み, 一致しないことを示している。樹高は地位の決定にも必要であり, 本モデルを実際の人工林経営に適用する場合, 樹高の測定の精度の向上が必要とな

表-6(1) シミュレーションによる単木直径の予測値 (試験地 032D)  
 Table 6(1). Predicted DBH of individual trees in the simulated plot 032D

個体 No.	林 齢 (年)									
	26	31	36	41	46	51	56	61	54	59
No.	実測値 (cm)	予 測 値 (cm)						実測値 (cm)	実測値 (cm)	
1	34.70	37.87	40.29	42.35	44.20	45.95	47.64	49.32	47.20	49.50
2	34.50	37.65	40.05	42.09	43.92	45.65	47.32	48.97	48.90	50.75
3	31.25	34.02	36.09	37.82	39.34	40.75	42.09	43.41	42.65	44.30
4	30.90	33.63	36.67	37.36	38.85	40.22	41.53	42.81	40.35	41.20
5	30.30	32.96	34.94	36.57	38.00	39.32	40.56	41.78	38.55	39.40
6	30.05	32.68	34.63	36.24	37.65	38.94	40.16	41.35	42.25	44.25
7	29.95	32.57	34.51	36.11	37.51	38.79	40.00	41.18	44.80	46.20
8	29.65	32.24	34.15	35.72	37.09	38.34	39.52	40.66	39.15	39.70
9	29.50	32.07	33.96	35.52	36.88	38.11	39.28	40.41	44.25	46.45
10	28.90	31.40	33.23	34.73	36.03	37.21	38.31	39.38	34.95	36.20
11	28.90	31.40	33.23	34.73	36.03	37.21	38.31	39.38	44.35	46.55
12	28.75	31.23	33.05	34.54	35.82	36.98	38.07	39.12	0.00	0.00
13	28.25	30.67	32.44	33.88	35.11	36.23	37.27	38.27	38.15	38.30
14	28.10	30.51	32.26	33.68	34.90	36.00	37.03	38.01	38.90	39.65
15	28.00	30.40	32.14	33.55	34.76	35.85	36.87	37.84	46.25	46.25
16	27.90	30.28	32.02	33.42	34.62	35.70	36.71	37.67	32.60	33.45
17	27.90	30.28	32.02	33.42	34.62	35.70	36.71	37.67	41.25	43.45
18	26.90	29.17	30.80	32.11	33.21	34.19	35.10	35.95	37.10	37.95
19	26.80	29.06	30.68	31.98	33.07	34.04	34.94	35.78	32.85	33.55
20	26.75	29.00	30.62	31.91	33.00	33.97	34.86	35.70	34.05	33.80
21	26.75	29.00	30.62	31.91	33.00	33.97	34.86	35.70	39.45	40.30
22	26.45	28.67	30.25	31.62	32.58	33.52	34.37	35.18	39.65	42.10
23	26.40	28.61	30.19	31.45	32.51	33.44	34.29	35.10	36.00	37.75
24	26.10	28.27	29.83	31.06	32.09	32.99	33.81	34.58	30.30	30.65
25	26.00	28.16	29.71	30.92	31.94	32.84	33.66	34.41	36.80	37.35
26	26.95	28.11	29.64	30.86	31.87	32.76	33.57	34.32	34.85	35.85
27	25.50	27.61	29.10	30.27	31.24	32.08	32.85	33.55	35.55	36.75
28	25.45	27.55	29.04	30.20	31.17	32.01	32.77	33.47	37.90	38.80
29	25.35	27.44	28.91	30.07	31.03	31.86	32.61	33.30	34.80	36.35
30	25.30	27.38	28.85	30.01	30.96	31.78	32.52	33.21	32.75	33.35
31	25.25	27.33	28.79	29.94	30.89	31.71	32.44	33.13	40.15	40.75
32	25.10	27.16	28.61	29.74	30.68	31.48	32.20	32.87	32.80	33.95
33	24.60	26.60	28.00	29.09	29.97	30.73	31.40	32.01	36.25	37.95
34	24.60	26.49	27.88	28.95	29.83	30.58	31.24	31.84	32.50	32.85
35	24.30	26.27	27.64	28.69	29.55	30.28	30.92	31.50	33.45	34.45
36	23.90	25.82	27.15	28.17	28.99	29.67	30.27	30.81	25.20	25.25
37	23.90	25.82	27.15	28.17	28.99	29.67	30.27	30.81	32.05	33.10
38	23.85	25.76	27.09	28.10	28.91	29.60	30.19	30.73	29.65	29.70

注: 直径 0.00 cm は枯死した事を示す.



表-6(1) (つづき)  
Table 6(1). (continued)

個体 No.	林 齢 (年)									
	26	31	36	41	46	51	56	61	54	59
	実測値 (cm)	予 測 値 (cm)							実測値 (cm)	実測値 (cm)
No. 39	23.75	25.65	26.97	27.97	28.77	29.45	30.03	30.56	34.00	35.70
40	23.70	25.60	26.91	27.90	28.70	29.37	29.95	30.47	33.60	35.25
41	23.60	25.48	26.78	27.77	28.56	29.22	29.79	30.30	31.95	32.55
42	23.45	25.32	26.60	27.58	28.35	29.00	29.55	30.04	28.75	28.90
43	23.35	25.21	26.48	27.44	28.21	28.85	29.39	29.87	30.20	31.15
44	23.30	25.15	26.42	27.38	28.14	28.77	29.31	29.78	28.90	29.15
45	23.20	25.04	26.30	27.25	28.00	28.62	29.15	29.61	26.25	26.30
46	23.20	25.04	26.30	27.25	28.00	28.62	29.15	29.61	30.05	31.05
47	23.20	25.04	26.30	27.25	28.00	28.62	29.15	29.61	31.85	34.05
48	22.85	24.65	25.87	26.79	27.51	28.09	28.59	29.01	22.70	22.65
49	22.70	24.48	25.69	26.59	27.29	27.87	28.34	28.76	30.10	31.20
50	22.70	24.48	25.69	26.59	27.29	27.87	28.34	28.76	29.60	30.45
51	22.50	24.26	25.45	26.33	27.01	27.56	28.02	28.41	30.55	31.00
52	22.25	23.98	25.14	26.00	26.66	27.19	27.62	27.99	30.95	31.80
53	22.20	23.92	26.08	25.93	26.59	27.11	27.54	27.90	25.55	25.75
54	22.20	23.92	25.08	25.93	26.59	27.11	27.54	27.90	32.05	33.95
55	21.95	23.64	24.78	25.61	26.24	26.74	27.14	27.47	26.10	25.85
56	21.90	23.59	24.71	25.54	26.17	26.66	27.06	27.39	25.50	25.55
57	21.90	23.59	24.71	25.54	26.17	26.66	27.06	27.39	0.00	0.00
58	21.90	23.59	24.71	25.54	26.17	26.66	27.06	27.39	0.00	0.00
59	21.80	23.48	24.59	25.41	26.03	26.51	26.90	27.21	31.85	33.60
60	21.75	23.42	24.53	25.34	25.96	26.43	26.82	27.13	24.30	24.15
61	21.70	23.36	24.47	25.28	25.89	26.36	26.74	27.04	30.00	30.90
62	21.70	23.36	24.47	26.28	25.89	26.36	26.74	27.04	30.20	30.50
63	21.65	23.31	24.41	25.21	25.81	26.28	26.66	26.96	24.65	24.55
64	21.60	23.25	24.35	25.15	25.74	26.21	26.58	26.87	29.35	29.75
65	21.50	23.14	21.23	25.01	25.60	26.06	26.41	26.70	31.40	32.45
66	21.50	23.14	24.23	25.01	25.60	26.06	26.41	26.70	23.00	23.10
67	21.50	23.14	24.23	25.01	25.60	26.06	26.41	26.70	29.90	30.35
68	21.45	23.08	24.17	24.95	25.53	25.98	26.33	26.61	32.10	33.40
69	20.85	22.42	23.44	24.16	24.69	25.08	25.37	25.59	23.75	24.00
70	20.85	22.42	23.44	24.16	24.69	25.08	25.37	25.59	26.60	27.15
71	20.75	22.30	23.32	24.03	24.55	24.93	25.21	25.42	0.00	0.00
72	20.65	22.19	23.19	23.90	24.41	24.78	25.05	25.24	26.60	26.85
73	20.55	22.08	23.07	23.77	24.26	24.63	24.89	25.07	26.45	27.05
74	20.40	21.91	22.89	23.57	24.05	24.40	24.65	24.82	22.60	22.60
75	20.40	21.91	22.89	23.57	24.05	24.40	24.65	24.82	28.05	29.00

表-6(1) (つづき)  
Table 6(1). (continued)

個体 No.	林 齢 (年)									
	26	31	36	41	46	51	56	61	54	59
	実測値 (cm)	予 測 値 (cm)						実測値 (cm)	実測値 (cm)	
No. 76	20.20	21.69	22.65	23.31	23.77	24.10	24.32	24.47	28.15	28.35
77	20.15	21.63	22.59	23.24	23.70	24.02	24.24	24.39	27.10	27.45
78	19.85	21.30	22.22	22.85	23.28	23.57	23.76	23.87	21.75	21.80
79	19.80	21.24	22.16	22.78	23.21	23.50	23.68	23.79	23.90	24.10
80	19.65	21.08	21.98	22.59	23.00	23.27	23.44	23.53	20.60	20.25
81	19.55	20.96	21.85	22.45	22.86	23.12	23.28	23.36	22.40	22.35
82	19.30	20.69	21.55	22.13	22.50	22.74	22.88	22.93	20.00	0.00
83	19.00	20.35	21.19	21.73	22.08	22.29	22.39	22.42	20.50	20.35
84	18.90	20.24	21.06	21.60	21.94	22.14	22.23	22.25	21.15	21.55
85	18.75	20.07	20.88	21.40	21.73	21.91	21.99	21.99	33.95	35.35
86	18.65	19.96	20.76	21.27	21.59	21.76	21.83	21.83	19.30	19.20
87	18.55	19.85	20.64	21.14	21.45	21.61	21.67	21.67	0.00	0.00
88	18.30	19.57	20.33	20.81	21.09	21.24	21.27	21.27	19.30	19.20
89	18.20	19.46	20.21	20.68	20.95	21.09	21.11	21.11	0.00	0.00
90	18.10	19.35	20.09	20.55	20.81	20.93	20.95	20.95	22.20	22.15
91	17.35	18.51	19.18	19.56	19.76	19.80	19.80	19.80	17.45	17.40
92	17.00	18.12	18.75	19.11	19.26	19.28	19.28	19.28	16.90	0.00
93	16.35	17.39	17.96	18.25	18.35	18.35	18.35	18.35	22.15	22.50
94	16.20	17.23	17.78	18.05	18.14	18.14	18.14	18.14	30.35	32.20
95	16.00	17.00	17.53	17.79	17.85	17.85	17.85	17.85	0.00	0.00
96	15.65	16.61	17.11	17.33	17.36	17.36	17.36	17.36	0.00	0.00
97	14.90	15.77	16.20	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.80	16.70
98	14.85	15.72	16.13	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	18.20	18.05
99	14.85	15.72	16.13	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.00	0.00
100	14.25	15.05	15.40	15.49	15.49	15.49	15.49	0.00	15.70	15.40
101	14.10	14.88	15.22	15.30	15.30	15.30	15.30	0.00	15.85	16.10
102	12.45	13.04	13.21	13.21	13.21	13.21	0.00	0.00	13.85	13.95
103	12.40	12.98	13.15	13.15	13.15	13.15	0.00	0.00	14.75	14.80
104	11.40	11.87	11.94	11.94	11.94	11.94	0.00	0.00	11.95	0.00
105	10.20	10.53	10.53	10.53	10.53	0.00	0.00	0.00	11.95	12.00
106	9.35	9.58	9.58	9.58	9.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
107	8.45	8.58	8.58	8.58	8.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
108	8.35	8.46	8.46	8.46	8.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
109	7.60	7.63	7.63	7.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
110	7.05	7.05	7.05	7.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
111	6.90	6.90	6.90	6.90	0.00	0.00	0.00	0.00	8.80	8.55
112	6.25	6.25	6.25	6.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表-6(2) シミュレーションによる単木樹高の予測値 (試験地 032D)

Table 6(2). Predicted height of individual trees in the simulated plot 032D

個体 No.	林 齢 (年)									
	26	31	36	41	46	51	56	61	54	59
	実測値 (m)	予 測 値								実測値 (m)
No. 1	22.901703	25.52	27.70	29.52	31.04	32.31	33.37	34.26	30.76	30.27
2	22.867148	25.48	27.67	29.49	31.01	32.28	33.34	34.22	30.93	30.34
3	22.229781	24.85	27.03	28.85	30.37	31.64	32.70	33.58	30.21	29.91
4	22.151584	24.77	26.95	28.77	30.29	31.56	32.62	33.51	29.87	29.63
5	22.012632	24.63	26.81	28.63	30.16	31.42	32.48	33.37	29.57	29.44
6	21.952839	24.57	26.75	28.57	30.09	31.36	32.42	33.31	30.16	29.90
7	21.928600	24.54	26.73	28.55	30.07	31.34	32.40	33.28	30.49	30.05
8	21.854759	24.47	26.65	28.48	30.00	31.27	32.33	33.21	29.67	29.47
9	21.817195	24.43	26.62	28.44	29.96	31.23	32.29	33.17	30.42	30.07
10	21.662504	24.28	26.46	28.28	29.80	31.07	32.13	33.02	28.84	28.90
11	21.662504	24.28	26.46	28.28	29.80	31.07	32.13	33.02	30.43	30.07
12	21.622691	24.24	26.42	28.24	29.76	31.03	32.09	32.98	0.00	0.00
13	21.486557	24.10	26.29	28.11	29.63	30.90	31.96	32.84	29.50	29.31
14	21.444663	24.06	26.24	28.07	29.59	30.86	31.92	32.80	29.63	29.47
15	21.416458	24.03	26.22	28.04	29.56	30.83	31.89	32.77	30.66	30.05
16	21.388028	24.00	26.19	28.01	29.53	30.80	31.86	32.74	28.26	28.62
17	21.388028	24.00	26.19	28.01	29.53	30.80	31.86	32.74	30.01	29.83
18	21.090956	23.71	25.89	27.71	29.23	30.50	31.56	32.45	29.30	29.27
19	21.059921	23.68	25.86	27.68	29.20	30.47	31.53	32.41	28.33	28.64
20	21.044310	23.66	25.84	27.67	29.19	30.46	31.51	32.40	28.63	28.68
21	21.044310	23.66	25.84	27.67	19.19	30.46	31.51	32.40	29.72	29.54
22	20.949312	23.57	25.75	27.57	29.09	30.36	31.42	32.30	29.76	29.72
23	20.933264	23.55	25.73	27.55	29.08	30.34	31.40	32.29	29.07	29.25
24	20.835531	23.45	25.63	27.46	28.98	30.25	31.31	32.19	27.59	28.08
25	20.802424	23.42	25.60	27.42	28.94	30.21	31.27	32.16	29.24	29.20
26	20.785769	23.40	25.58	27.41	28.93	30.20	31.26	32.14	28.82	28.99
27	20.632785	23.25	25.43	27.25	28.77	30.04	31.10	31.99	28.98	29.12
28	20.615437	23.23	25.41	27.24	28.76	30.03	31.09	31.97	29.45	29.37
29	20.580528	23.20	25.38	27.20	28.72	29.99	31.05	31.94	28.81	29.06
30	20.562966	23.18	25.36	27.18	28.70	29.97	31.03	31.92	28.30	28.60
31	20.545331	23.16	25.34	27.17	28.69	29.96	31.02	31.90	29.84	29.58
32	20.491990	23.11	25.29	27.11	28.63	29.90	30.96	31.85	28.32	28.70
33	20.309354	22.93	25.11	26.93	28.45	29.72	30.78	31.66	29.13	29.27
34	20.271913	22.89	25.07	26.89	28.41	29.68	30.74	31.63	28.24	28.51
35	20.196093	22.81	25.00	26.82	28.34	29.61	30.67	31.55	28.49	28.78
36	20.040624	22.66	24.84	26.66	28.18	29.45	30.51	31.40	25.61	26.62
37	20.040624	22.66	24.84	26.66	28.18	29.45	30.51	31.40	28.11	28.56
38	20.020823	22.64	24.82	26.64	28.16	29.43	30.49	31.38	27.38	27.87
39	19.980974	22.60	24.78	26.60	28.12	29.39	30.45	31.34	28.62	28.97
40	19.960925	22.58	24.76	26.58	28.10	29.37	30.43	31.32	28.52	28.91
41	19.920573	22.54	24.72	26.54	28.06	29.33	30.39	31.28	28.09	28.46
42	19.859410	22.48	24.66	26.48	28.00	29.27	30.33	31.21	27.07	27.68

注: 樹高 0.00 m は枯死した事を示す。

表-6(2) (つづき)  
 Table 6(2). (continued)

個体 No.	林 齢 (年)									
	26	31	36	41	46	51	56	61	54	59
	実測値 (m)			予	測	値			実測値 (m)	実測値 (m)
No. 43	19.818206	22.43	24.62	26.44	27.96	29.23	30.29	31.17	27.56	28.19
44	19.797474	22.41	24.60	26.42	27.94	29.21	30.27	31.15	27.13	27.74
45	19.755749	22.37	24.55	26.38	27.90	29.17	30.23	31.11	26.09	26.96
46	19.755749	22.37	24.55	26.38	27.90	29.17	30.23	31.11	27.51	28.17
47	19.755749	22.37	24.55	26.38	27.90	29.17	30.23	31.11	28.06	28.72
48	19.606920	22.22	24.41	26.23	27.75	29.02	30.08	30.96	24.31	25.62
49	19.541782	22.16	24.34	26.16	27.68	28.95	30.01	30.90	27.53	28.20
50	19.541782	22.16	24.34	26.16	27.68	28.95	30.01	30.90	27.37	28.04
51	19.453642	22.07	24.25	26.07	27.60	28.86	29.92	30.81	27.67	28.16
52	19.341355	21.96	24.14	25.96	27.48	28.75	29.81	30.70	27.79	28.32
53	19.318611	21.93	24.12	25.94	27.46	28.73	29.79	30.67	25.78	26.79
54	19.318611	21.93	24.12	25.94	27.46	28.27	29.79	30.67	28.11	28.70
55	19.203440	21.82	24.00	25.82	27.35	28.61	29.67	30.56	26.02	26.82
56	19.180112	21.80	23.98	25.80	27.32	28.59	29.65	30.53	25.57	26.72
57	19.180112	21.80	23.98	25.80	27.32	28.59	29.65	30.53	0.00	0.00
58	19.180112	21.80	23.98	25.80	27.32	28.59	29.65	30.53	0.00	0.00
59	19.133158	21.75	23.93	25.75	27.27	28.54	29.60	30.49	28.06	28.65
60	19.109531	21.73	23.91	25.73	27.25	28.52	29.58	30.46	25.17	26.23
61	19.085805	21.70	23.88	25.71	27.23	28.50	29.56	30.44	27.50	28.05
62	19.085805	21.70	23.88	26.71	27.23	28.50	29.56	30.44	27.56	28.14
63	19.061977	21.68	23.86	25.68	27.20	28.47	29.53	30.42	25.35	26.37
64	19.038048	21.65	23.84	25.66	27.18	28.45	29.51	30.39	27.28	27.89
65	18.989885	21.61	23.79	25.61	27.13	28.40	29.46	30.34	27.93	28.44
66	18.989885	21.61	23.79	25.61	27.13	28.40	29.46	30.34	24.48	25.81
67	18.989885	21.61	23.79	25.61	27.13	28.40	29.46	30.34	27.46	28.02
68	18.965650	21.58	23.76	25.59	27.11	28.38	29.44	30.32	28.13	28.61
69	18.666666	21.28	23.47	25.29	26.81	28.08	29.14	30.02	24.89	26.17
70	18.666666	21.28	23.47	25.29	26.81	28.08	29.14	30.02	26.24	27.22
71	18.615326	21.23	23.41	25.24	26.76	28.03	29.09	29.97	0.00	0.00
72	18.563555	21.18	23.36	25.18	26.71	27.97	29.03	29.92	26.24	27.13
73	18.511343	21.13	23.31	25.13	26.65	27.92	28.98	29.87	26.17	27.19
74	18.432188	21.05	23.23	25.05	26.57	27.84	28.90	29.79	24.25	25.60
75	18.432188	21.05	23.23	25.05	26.57	27.84	28.90	29.79	26.82	27.71
76	18.325064	20.94	23.12	24.95	26.47	27.74	28.80	29.68	26.85	27.54
77	18.297997	20.91	23.10	24.92	26.44	27.71	28.77	29.65	26.44	27.30
78	18.133156	20.75	22.93	24.75	24.75	27.54	28.60	29.49	23.74	25.23
79	18.105272	20.72	22.90	24.73	26.25	27.52	28.58	29.46	24.97	26.21
80	18.020903	20.64	22.82	24.64	26.16	27.43	28.49	29.38	22.98	24.44
81	17.964058	20.58	22.76	24.59	26.11	27.38	28.43	29.32	24.13	25.49
82	17.819813	20.44	22.62	24.44	25.96	27.23	28.29	29.17	22.56	0.00
83	17.642632	20.26	22.44	24.26	25.78	27.05	28.11	29.00	22.91	24.49

表-6(2) (つづき)  
Table 6(2). (continued)

個体 No.	林 齢 (年)									
	26	31	36	41	46	51	56	61	54	59
	実測値 (m)	予 測 値 (m)							実測値 (m)	実測値 (m)
No. 84	17.582564	20.20	22.38	24.20	25.72	26.99	28.05	28.94	23.35	25.11
85	17.491503	20.11	22.29	24.11	25.63	26.90	27.96	28.84	28.61	28.92
86	17.430151	20.05	22.23	24.05	25.57	26.84	27.90	28.75	22.04	23.83
87	17.368279	19.98	22.17	23.99	25.51	26.78	27.84	28.67	0.00	0.00
88	17.211296	19.83	22.01	23.83	25.35	26.62	27.68	28.45	22.04	23.83
89	17.147571	19.76	21.95	23.77	25.29	26.56	27.62	28.37	0.00	0.00
90	17.083308	19.70	21.88	23.70	25.23	26.49	27.55	28.28	24.01	25.39
91	16.583801	19.20	21.38	23.20	24.73	25.99	26.92	27.47	20.52	22.61
92	16.339816	18.96	21.14	22.96	24.48	25.75	26.59	27.06	20.02	0.00
93	15.867645	18.48	20.67	22.49	24.01	25.17	25.87	26.18	23.98	25.55
94	15.755087	18.37	20.55	22.38	23.90	25.03	25.69	25.97	27.61	28.40
95	15.602874	18.22	20.40	22.22	23.74	24.83	25.44	25.68	0.00	0.00
96	15.330565	17.95	20.13	21.95	23.47	24.48	25.01	25.16	0.00	0.00
97	14.721130	17.34	19.52	21.34	22.77	23.60	23.96	23.93	19.92	22.08
98	14.679228	17.29	19.48	21.30	22.72	23.54	23.88	23.85	21.16	23.08
99	14.679228	17.29	19.48	21.30	22.72	23.54	23.88	23.85	19.15	0.00
100	14.163817	16.78	18.96	20.78	22.07	22.76	22.96	22.79	18.85	20.97
101	14.031318	16.65	18.83	20.65	21.90	22.55	22.72	22.51	19.00	21.59
102	12.477561	15.09	17.28	18.92	19.79	20.06	19.84	0.00	16.84	19.56
103	12.427757	15.04	17.23	18.86	19.72	19.97	19.75	0.00	17.85	20.41
104	11.399670	14.02	16.20	17.60	18.23	18.25	17.81	0.00	14.50	0.00
105	10.092228	12.71	14.78	15.92	16.27	16.02	0.00	0.00	14.50	17.30
106	9.1266095	11.74	13.64	14.59	14.75	14.34	0.00	0.00	0.00	0.00
107	8.0805615	10.70	12.40	13.15	13.12	12.54	0.00	0.00	0.00	0.00
108	7.9634458	10.58	12.26	12.98	12.93	12.34	0.00	0.00	10.47	13.30
109	7.0841211	9.70	11.22	11.76	11.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
110	6.4428689	9.00	10.41	10.83	10.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
111	6.2692965	8.80	10.18	10.57	10.24	0.00	0.00	0.00	10.11	12.25
112	5.5276949	7.95	9.21	9.48	9.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表-7 林分成長の予測値および実測値の概要  
Table 7. Summary of the estimated and measured stand growth

			1956 実測値	1991 年予測値	1989 年実測値
胸高直径	平均	cm/本	21.59	29.54	30.50
樹高	平均	m/本	20.48	32.27	29.04
胸高断面積	平均	cm <sup>2</sup> /本	393.20	725.50	795.00
	面積当たり	m <sup>2</sup> /ha	62.03	101.16	106.38
樹幹表面積	平均	m <sup>2</sup> /本	6.5380	14.2650	12.9610
	面積当たり	m <sup>2</sup> /ha	10313.00	19891.20	17342.40
幹材積	平均	m <sup>3</sup> /本	0.3892	1.1232	1.0867
	面積当たり	m <sup>3</sup> /ha	614.00	1566.15	1454.04
本数密度		本/ha	1577.50	1394.40	1338.00

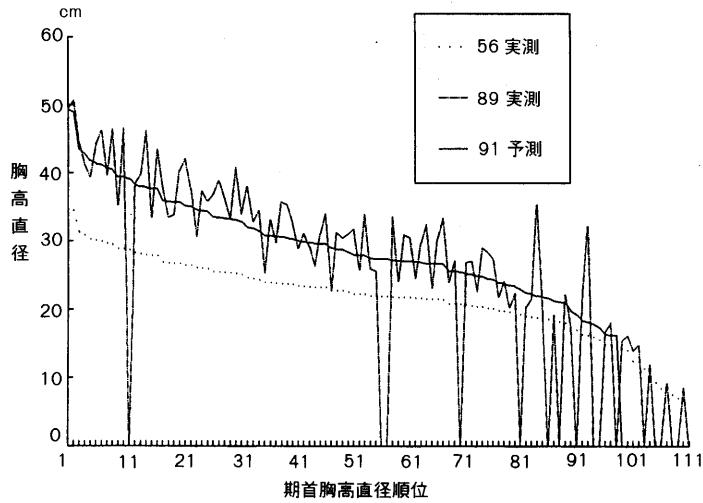


図-10 毎木胸高直径の予測値と実測値  
胸高直径が0の個体は枯死した事を示す。

Fig. 10. Estimated and measured DBHs in a plot  
0 cm of DBH means the death of the tree.

る。また、小径木の成長量の過大評価は、仮定2についての検討が必要である。

以上のように、胸高直径は過小に、樹高は過大に評価され、幹材積、樹幹表面積も過大に見積られている。幹材積、樹幹表面積の時間に伴う変化は、I章において収穫表によって論じた(図-2)。図-12に単位面積当たりの樹幹表面積と幹材積の時間変化を示す。これらの時間変化は予測値、実測値ともに図-2と同様、材積が直線的に増大するのに対し、表面積は上に凸の弧を描いており、定性的に似た傾向を示す。よって、樹高成長および枯死についてより正確なモデルを導入すれば、定量的により正確な林分子予測が可能となろう。

## V. 考 察

1) 式(15)における第1,2項は個体の樹幹生産量を表しており、単位は[m<sup>3</sup>/本/年]である。一方、式(22)、式(23)のAは[m<sup>3</sup>/年/ha]である。したがって、個体*i*の材積生産量と林分の材積生産量の比は個体*i*の占有面積 $S_{\alpha i}$ または局所密度 $\rho^*_{i}$ と考えられる。

$$S_{\alpha i} = \frac{pakH_i^{\alpha-1}D_i^\beta + \beta aV_i}{A} \times 10,000$$

$$= \frac{pakH_i^{\alpha-1}D_i^\beta + \beta aV_i}{(pak \sum H^{\alpha-1}D^\beta + \beta a \sum V)/SQ} \times 10,000 \quad [m^2/本] \quad (35)$$

$$\rho^*_{i} = \frac{A}{pakH_i^{\alpha-1}D_i^\beta + \beta aV_i} \quad [本/ha] \quad (36)$$

$$S_{\alpha i} = 10,000/\rho^*_{i} \quad [m^2/本] \quad (37)$$

単木の同化量に比例する占有面積と呼吸に比例する樹幹表面積の関係を考察するために、試験地032Dの実測値ならびに予測結果について、横軸に占有面積をそれぞれ対数でプロットしたのが図-13である。各単木の時間的变化は1本の曲線で描かれている。

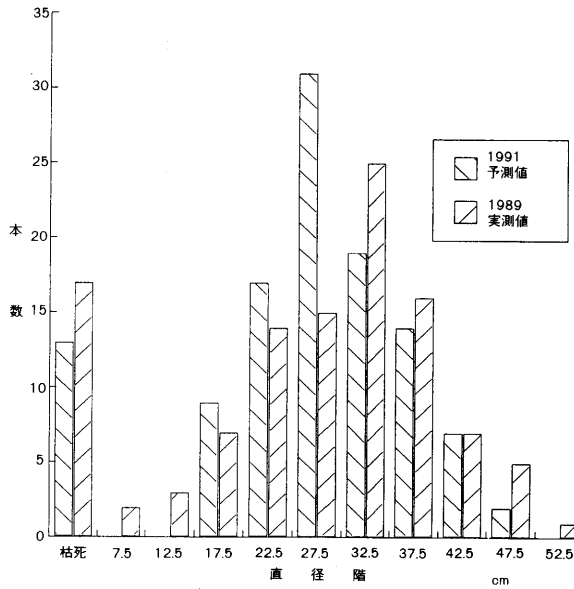


図-11(1) 成長の予測値と実測値のヒストグラム (試験地 032D) —胸高直径.

Fig. 11(1). Histogram of the estimated and measured growth (plot 032D)—DBH.

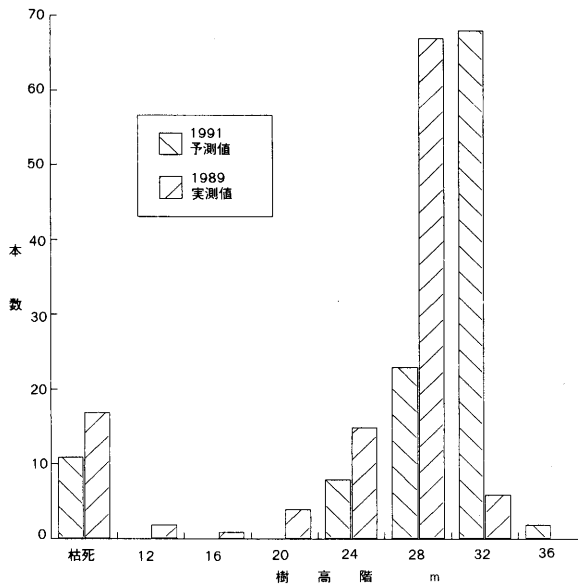


図-11(2) 成長の予測値と実測値のヒストグラム (試験地 032D) —樹高.

Fig. 11(2). Histogram of the estimated and measured growth (plot 032D)—Height.

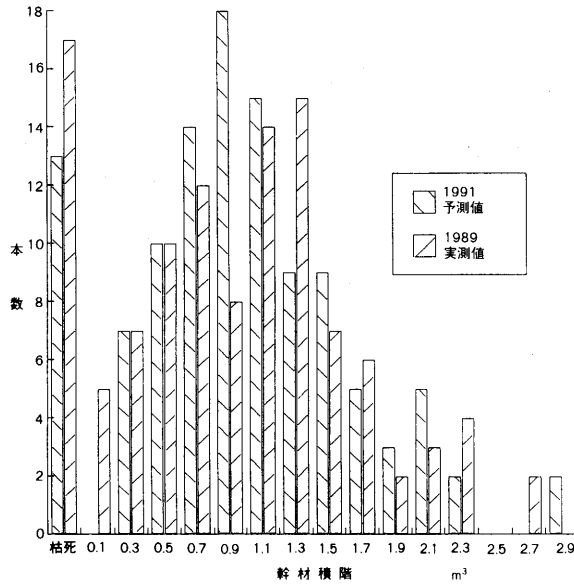


図-11(3) 成長の予測値と実測値のヒストグラム (試験地 032D) —樹幹材積.

Fig.11(3). Histogram of the estimated and measure growth (plot 032D)—Stem volume.

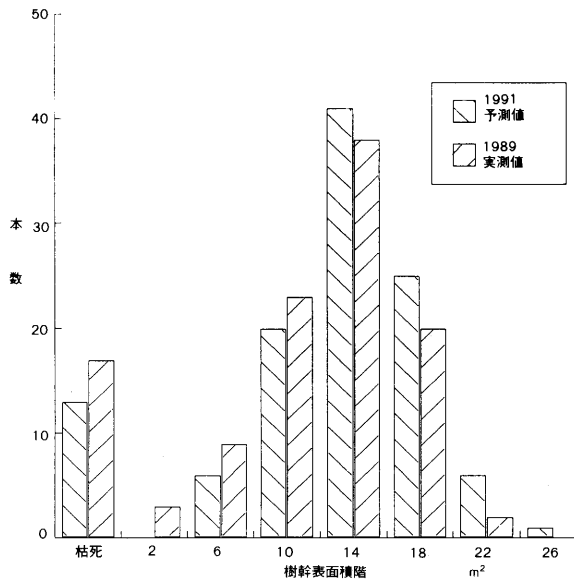


図-11(4) 成長の予測値と実測値のヒストグラム (試験地 032D) —樹幹表面積.

Fig.11(4). Histogram of the estimated and measured growth (plot 032D)—Stem surface area.



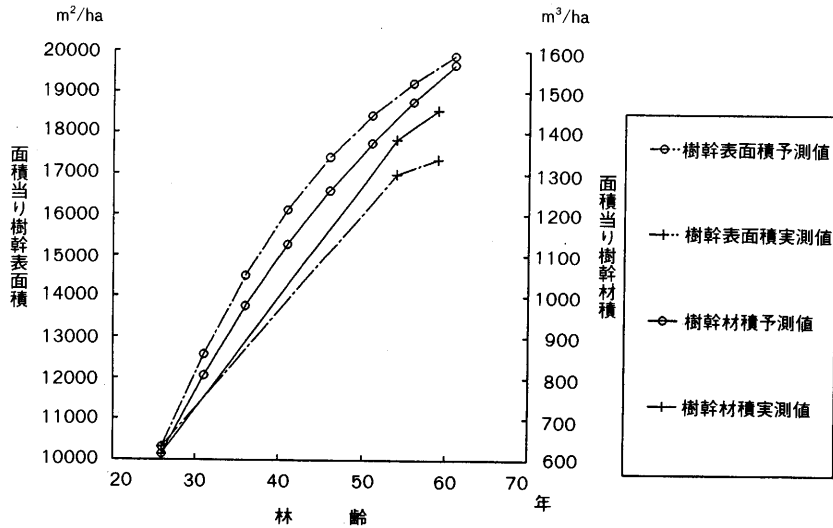


図-12 面積当り樹幹表面積，樹幹材積の時間変化。

Fig. 12. Change for stem surface area and stem volume per unit area with stand age.

優勢木が右上に，劣勢木が左下に位置している。図-13(2)上で劣勢木の枯死した点を結ぶと，傾きがほぼ1の直線が現れる。そして，生存木はその直線の下側にある。つまり，単木の樹幹表面積が占有面積に対し一定の割合に達したときに枯死するといえる。

そして，この直線は式(15)の左辺が0となる点，すなわち仮定4の軌跡である。式(15)より

$$0 = pakH_i^{a-1}D_i^\beta + \beta aV_i - \frac{p}{q}\beta bS_i$$

$$\frac{p}{q}\beta bS_i = pakH_i^{a-1}D_i^\beta + \beta aV_i$$

ここで，式(35)より

$$\frac{p}{q}\beta bS_i = \frac{A}{10,000} S_{0i}$$

$$S_i = \frac{q}{p\beta b} \cdot \frac{A}{10,000} S_{0i} \tag{38}$$

この曲線を「枯死ライン」と呼ぶことにする。 $A, p, q, \beta$ は時間に対し一定である。 $b$ は時間とともに増大するが，図-13, 14の範囲ではその比が少ないので一定と見なす。また，この直線に対数座標上で平行な直線は，材積成長量一定の線である。すなわち， $dV/dt = v (> 0)$ となる直線は

$$v = pakH_i^{a-1}D_i^\beta + \beta aV_i - \frac{p}{q}\beta bS_i$$

$$S_i = \frac{q}{p(\beta b - v)} \cdot \frac{A}{10,000} S_{0i} \tag{39}$$

優勢木では，樹幹表面積の成長とともに占有面積も増大させるので右上に向かう軌跡を描き，枯死ラインには近づかない。これに対し，劣勢木では占有面積が減少してさらに材積生産量が低下

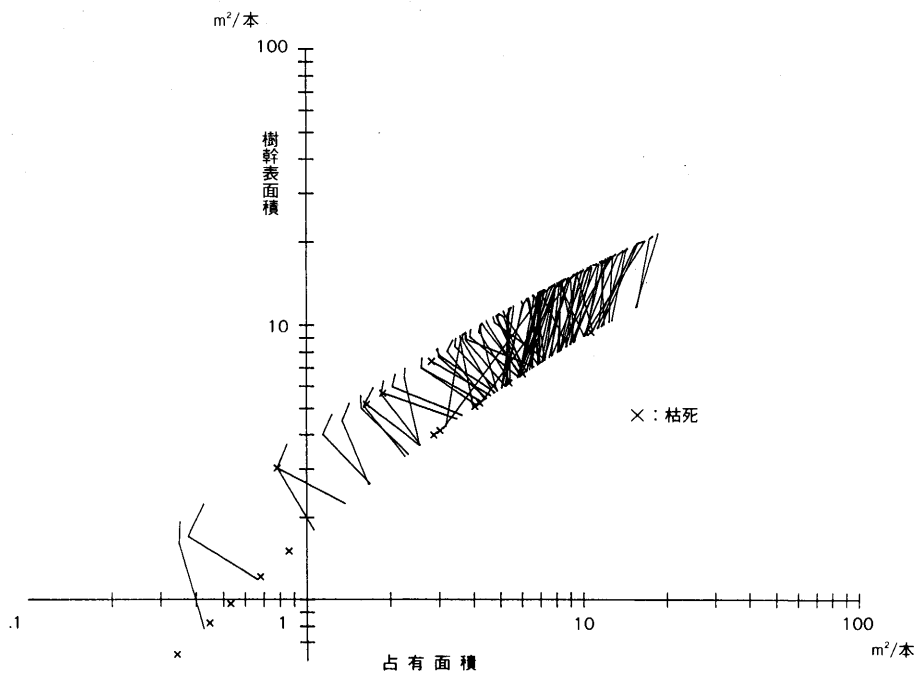


図-13(1) 単木の占有面積と樹幹表面積—実測値.

Fig. 13(1). Growing space and stem area of trees—measured.

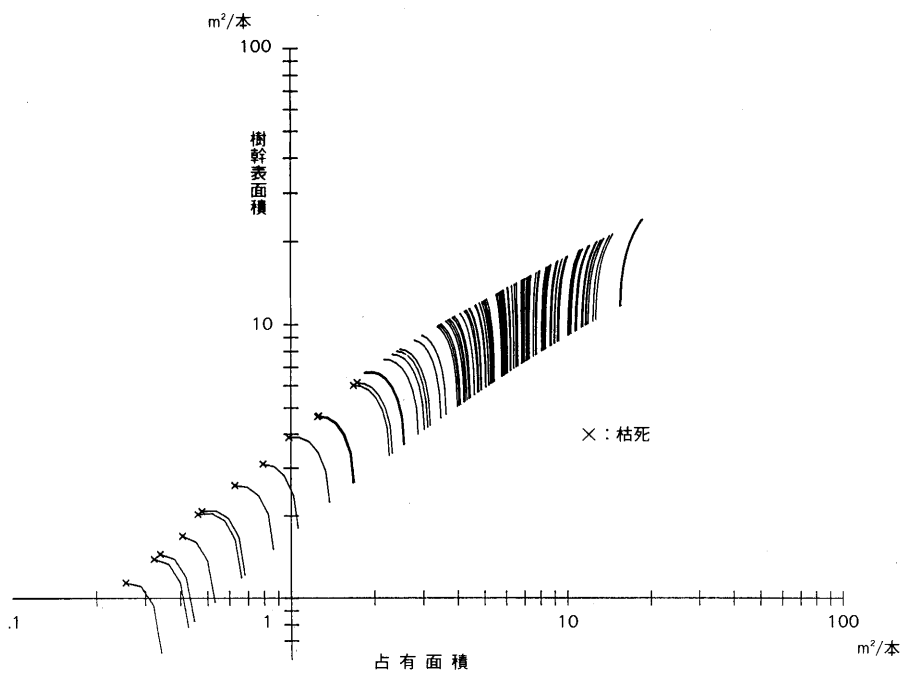


図-13(2) 単木の占有面積と樹幹表面積—シミュレーション結果.

Fig. 13(2). Growing space and stem surface area of trees—simulated.

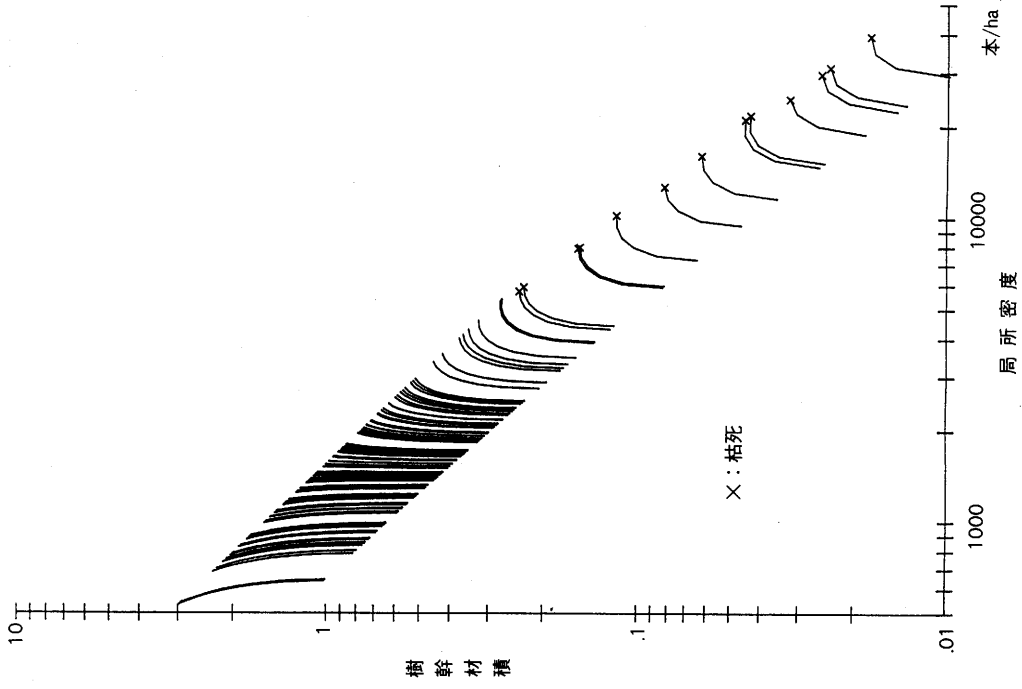


図-14(2) 単木の局所密度と樹幹材積—シミュレーション結果.

Fig.14(2). Local density and stem volume of trees—simulated.

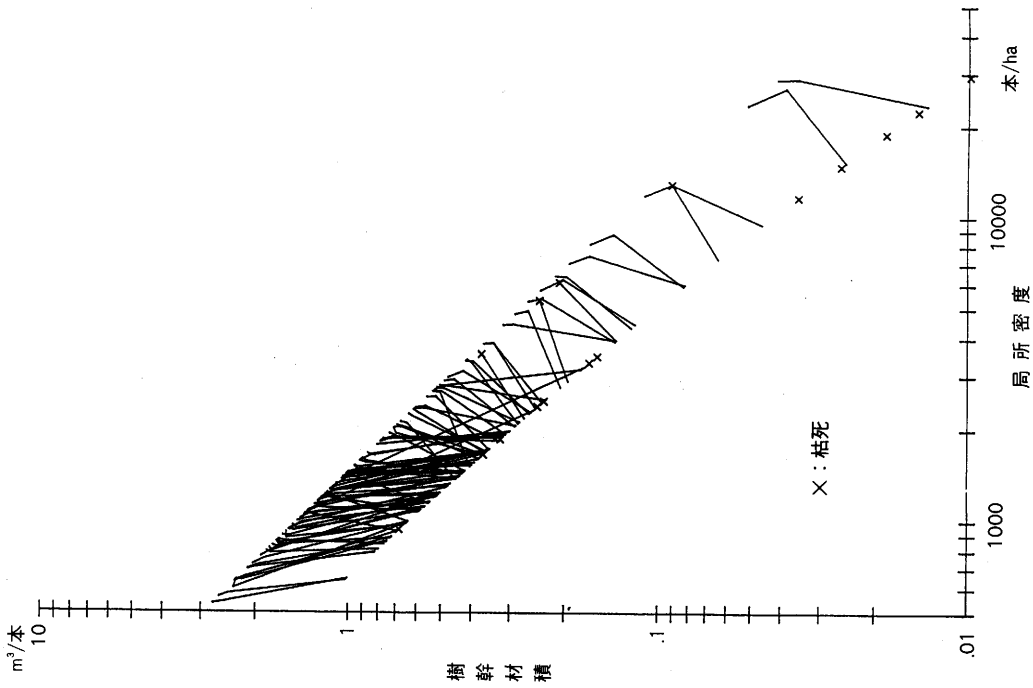


図-14(1) 単木の局所密度と樹幹材積—実測値.

Fig.14(1). Local density and stem volume of trees—measured.

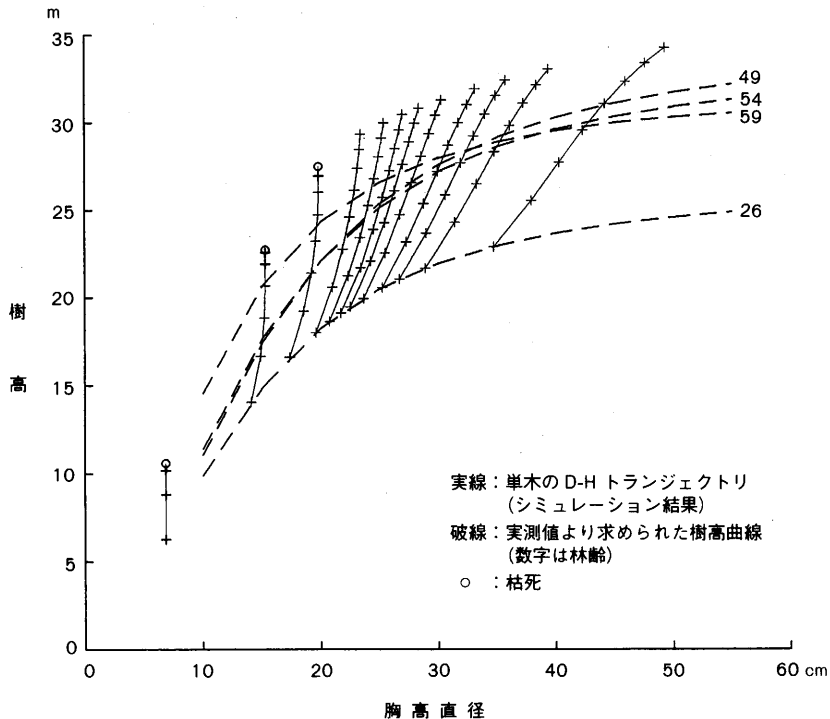


図-15 予測による単木のD-Hトラジェクトリ.

Fig. 15. Simulated D-H trajectory of trees.

するので急速に枯死ラインに近づき、最後に交差して枯死する。

さらに、林内の各単木の幹材積と局所密度の関係を論じることができる。図-14は実測値ならびに予測結果を、局所密度を横軸に、材積を縦軸に、それぞれ対数でプロットしたものである。

劣勢木が枯死した点を結ぶと、傾きがほぼ $-3/2$ の直線が現れる。この直線が、単木の最多密度曲線を表していると考えられる。

YODA *et al.*<sup>31)</sup> は自己間引きの起こっている植物の群落について、 $3/2$ 乗法則を導いた。

$$w\rho^{3/2} = K = \text{const.} \quad (40)$$

ここで、 $w$ : 平均個体重、 $\rho$ : 個体密度、 $K$ : 定数

小川(19)はこの法則の次元解析から、植物の占有空間当たりの生物量濃度が最終的に一定であると見た。

個体重がその体積に比例すると仮定するならば、式(40)は両辺を $2/3$ 乗することにより次式のようなになる。

$$\begin{aligned} (w\rho^{3/2})^{2/3} &= K^{2/3} = \text{const.} \\ (cV\rho^{3/2})^{2/3} &= V^{2/3}\rho = K' = \text{const.} \end{aligned} \quad (41)$$

ここで、 $c$ : 比重(定数)、 $K' = (K/c)^{2/3}$

式(41)の両辺の次元は $[m^2/\text{ha}]$ となる。すなわち、 $3/2$ 乗法則は林木に関しては、式(24)より導かれたようにモデルで仮定した単位面積当たりの最大樹幹表面積が一定であるということと矛

盾しない。

2) 仮定 5 は材積成長式と直径成長式の矛盾を解消するために導入した。実際に数式上では、直径成長が停止してもなお生存を続ける個体を説明することができる。図-15 に 1956 年において胸高直径の大きいものから 10 番目毎の単木の 1956 年から 1991 年までの D-H トラジェクトリを示す。シミュレーションによる結果と樹幹解析資料の D-H トラジェクトリ (図-15, 図-3 (3)) を比較して、双方ともに成長の衰えはまず直径に現れていることがわかる。しかし、生物の成長では画然と相が変わることは少ないので、この点を統一的に説明するモデルが必要であろう。本論文では樹高成長に関する十分な資料がなかったために、この仮定の妥当性は検討しなかった。

樹高成長と直径成長の関係については榎本・篠崎<sup>5)</sup>が個体重の成長を 3 段階に分ける次のモデルを提案している。

- ① 個体はその占有面積  $S$  が個体群の平均占有面積  $s(=1/\rho)$  に等しくなるまでは相似形を保って成長する。
- ②  $S$  が  $s$  に等しくなった後は、 $S$  は成長しない。
- ③ 成長が進むと、何等かの要因により高さ  $H$  の成長も抑制され、 $H$  の上限値が存在する。

平均レベルでのモデルであるが、肥大成長が停止して後に伸長成長が停止する点が仮定 5 と共通である。

3) 林分材積生産量  $A$  が一定という仮定 6 は、III 章での考察の通りほぼ一様である。しかし、同一の林分でも観測時によって違いがある。樹高測定や地位決定の精度が非常に悪いことも明確な傾向を見いだせない原因の一つであろう。今後さらに検討が必要である。

4) 間伐後、または大量の枯死のあった直後の林分では、ある胸高直径以下の小径成長量が一樣となる傾向が現れた。林分の間伐効果は、直径成長式 (14) を次のように拡張することにより表すことができるものと考えられる。

$$(1) \quad \frac{dD}{dt} = aD - b \quad [\text{m/年}] \quad (D \geq D_*) \quad (42)$$

$$(2) \quad \frac{dD}{dt} = aD_* - b \quad [\text{m/年}] \quad (D < D_*) \quad (43)$$

ここで、 $D_*$ : 直径成長量が一樣となる胸高直径の最大値

間伐、大量の枯死直後では  $D_* > b/a$  となると考えられる。 $D_* = b/a$  の場合、仮定 2, 5 で表される無間伐林分の直径成長式である。間伐による  $D_*$  の変化を今後検討する必要がある。

## おわりに

本論文では、樹木の呼吸は体積よりもむしろ表面積に比例することに注目し、また同齡単純林内の胸高直径、樹高の成長に関する従来のモデルを元に林分の生産量を単木に分配するモデルを導いて、新たな単木距離独立型林分材積成長モデルを導いた。そして、そのモデルを用いて現実の林分の成長予測を行い、実測値との比較を行った。

林分の材積生産量が一定であり、また呼吸が表面積に比例するという仮定から、林内競争で同化量が呼吸量を下回った林木から枯死してゆき、優勢木がますます同化量を増やして行く過程を表すものとして最多密度曲線に近づく林分の密度と材積の軌跡が表現された。このことは、最終

収量（材積）が一定となるのではなく、最終表面積が一定となることを示しており、個体の巨大化と自己間引きにより単位材積当たりの表面積を減少させながら材積を増大し続けることを物語っている。このことから、林木に関する3/2乗法則も新たな解釈が可能となる。

林分の総生産量一定という概念は古くから提唱されているが、定量的に算出することは困難である。経営的な指標（胸高直径、樹高等）から生態的に意味のある数値を導くことはさらに難しく、本論文でも実測値から算出された概算値をそのまま適用した。また、林分の生産量の単木への分配のサブモデルは、これまでに得られている経験的な知見を参考にした。このように、各部については検討の余地があるものの、呼吸に関する仮定を元に、林分材積成長モデルとして、一つの原型が構築された。資料数を増やすなどしてさらに仮定の検討を行い、より予測の精度をあげることが必要である。

### 引用文献

- 1) 阿部信行：トドマツ人工林の生長予測 (I) 人工林内の個体に対する生長曲線のパラメータの解析. 98 回日林論, 119-120, 1987.
- 2) ————：トドマツ人工林間伐の体系化に関する基礎的研究. 北林試報, 26, 1-96, 1989.
- 3) von Bertalanffy, L.: GENERAL SYSTEM THEORY. George Braziller. New York, 1968 (邦訳：長野 敬, 太田邦昌共訳：一般システム理論. 237 pp., みすず書房. 1973).
- 4) 秩父演習林・林対科森林経理学研究室：秩父演習林における樹幹解析資料. 演習林 (東大), 25, 161-204, 1987.
- 5) 榎本 敬・篠崎吉郎：第 18 回日本生態学会講演要旨, 1971.
- 6) Glass, R. N.: A technique for fitting nonlinear models to biological data, Ecology, 48, 1010-1013, 1967.
- 7) 畑野健一・佐々木恵彦編著：樹木の生長と環境. 養賢堂. 383 pp., 1987.
- 8) 本多静六原著：増補改訂森林家必携. 林野弘済会. 793 pp., 1961.
- 9) 猪瀬光雄：トドマツの単木生長モデル (I) 枝の生長と樹冠の発達. 日林誌, 63, 410-415, 1981.
- 10) 石川善郎：RICHARDS 生長関数によるスギ樹幹直径の生長解析. 日林誌, 68, 429-432, 1986.
- 11) Ito, T.: A system of growth models for even-aged pure stands based on the RICHARDS growth function (IV) Estimation of the parameters using data from a temporary sample plot and stem-analyzed sample trees. J. Jpn. For. Soc., 70, 95-103, 1988.
- 12) 梶原幹弘：陽樹冠表面積と幹表面積による幹材積生長量の推定. 日林誌, 67, 501-505, 1985.
- 13) ХИЛЬМИ, Г. Ф.: ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ БИО ГЕОФЗИКА ЛЕСА (邦訳：高橋清訳：森林の生物物理学理論. 新科学文献刊行会. 143 pp., 1965).
- 14) 木梨謙吉, 西沢正久, 長 正道：林分シミュレーションに対する生長モデルの研究 (I) モデル設定の概要. 日林九支論, 29, 45-46, 1976.
- 15) Kira, T. and T. Shidei.: Primary Production and Turnover of organic matter in different forest ecosystems of the western pacific. Jpn. J. Eco., 17, 70-87, 1967.
- 16) 小林正吾：カラマツ人工林の林分生長モデルに関する研究. 北林試報, 15, 別刊. 163 pp., 1978.
- 17) Melzer, E. W.: Die stochastischen Beziehungen zwischen Sproß- und Wurzelsystem des Baumes. Arch. Forstw., 11, 822-838, 1962.
- 18) 内藤健司：Richards function に基づいた林分生長解析 (III) w-N 曲線. 日林誌, 66, 454-461, 1984.
- 19) 小川房人：個体群の群落と構造 (植物生態学講座 5). 朝倉書店. 221 pp., 1980.
- 20) 大隅真一・北村昌美・菅原 聰・大内幸雄・梶原幹弘・今永正明：森林計測学. 養賢堂. 415 pp., 1971.
- 21) ————：Richards の生長関数とその林木生長への応用. 87 回日林論. 111-112, 1976.
- 22) Prodan, M.: Messung der Waldbestände. J. D. SAUER-LAENDER's Verlag, Frankfurt, 260 pp., 1951.
- 23) Richards, F. J.: A flexible growth function for empirical use. J. Exp. Bot., 10, 290-300, 1959.
- 24) 林野庁計画課編：立木幹材積表一東日本編一. 日本林業調査会, 333 pp., 1970.
- 25) 鈴木太七：森林経理学. 朝倉書店, 197 pp., 1979.

- 26) Tanaka, K.: A Stochastic Model of Diameter Growth in an Even-Aged Pure Forest Stand. J. Jpn. For. Soc., **68**, 226-236, 1986.
- 27) ———: A Stochastic Model of Height Growth in an Even-Aged Pure Forest Stand. J. Jpn. For. Soc., **70**, 20-29, 1988.
- 28) 龍原 哲・箕輪光博: 人工林の直径分布の推移に関する理論的研究—直径階別枯損確率の推定—。東大演報, **80**, 203-255, 1988.
- 29) 山本博一, 伊藤幸也, 大畑 茂, 佐々木和男, 大村和也: 秩父演習林における間伐試験地直径生長資料。演習林 (東大), **26**, 1-156, 1988.
- 30) ———・龍原 哲: 東京大学秩父演習林の樹幹解析資料による樹幹形の分析。演習林 (東大), **25**, 205-241, 1987.
- 31) Yoda, K., Kira, T., Ogawa, H. and Hozumi, K.: Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural condition. J. Inst. Polytech. Osaka City Univ. Ser. D, **14**, 107-129, 1963.  
(1992年10月30日受理)

## 要 旨

本論文の目的は、樹木の内部の木化による単位材積当たりの呼吸量を低下させながら成長するという点を考慮しながら、同化と呼吸の差として人工一斉林分内の林木の成長過程を表そうとするものである。モデルの検証には、東京大学秩父演習林の樹幹解析資料および間伐試験地資料を利用した。

生物の成長量は同化量と呼吸量の差によって表せられるという仮定を用いて、多くの生物の成長過程が記述されている。しかし、樹木の成長を表す場合に、その呼吸量は必ずしもその体重或いは体積に比例していないことを考慮した記述は少ない。そこで、筆者らは、同化量と呼吸量の差としてより論理的に正しく表される林木の成長モデルを組み立てることを試みた。成長と同化・呼吸の関係は林分全体と同様に林内の単木にも当てはまり、単木成長の全体として林分成長が表されるとして、単木距離独立型林分成長モデルを構築した。

モデルの導入に当たっては、以下の仮定を設けた。

1. 林木の幹材積、樹幹表面積は樹高および胸高直径で山本-Schumacher式により表される。樹幹表面積は幹材積に比べ、樹高は同次、胸高直径は1次低い。
2. 直径成長量は期首直径と直線関係にある。
3. 樹高成長量はある林齢において林分内の全林木で一定である。
4. 仮定1, 2, 3より導かれる材積成長式より、材積成長量が負となる個体は枯死する。
5. 仮定2の直径成長が見かけ上負となる場合、実際には直径成長が0となり、その代わりに樹高成長が衰える。
6. 材積成長式の樹幹表面積に比例する項を呼吸の項と見なし、材積成長量と呼吸量の和として材積生産量を定義する。林分の総和としての林分材積生産量は林齢に関わらず林分により一定である。

このモデルの特徴は、ひとつには単位面積当たりの樹幹表面積は林分に特有の最大値を越えないが自己間引きにより蓄積は増加し続けるという点であり、いまひとつには単木距離独立型モデルにより林分成長、単木の材積成長、直径成長、樹高成長、枯死を統一的に記述した点である。

本論文ではまず、樹幹解析資料を用いて材積式およびそのパラメータの検討を、間伐試験地資料を用いて成長式およびそのパラメータの検討を行った。次に、モデルにそのパラメータを用いて実際の試験地の過去からの成長シミュレーションを行い、現在の実測値と予測値とを比較検討

した。

最後に、モデルによる予測で示された林分および林内の単木の成長の過程を、密度管理図上での林分および単木の成長の軌跡として、 $3/2$ 乗法則と関連づけて考察した。そして、密度管理図上で傾き  $-3/2$  の直線として表される最多密度曲線は、このモデルの仮定によれば、各単木の単位面積当たりの最大樹幹表面積が一定であることを示していると解釈できることを示した。

**キーワード：** 人工林, 単木距離独立型林分成長モデル, 成長シミュレーション, 呼吸量, 樹幹表面積

### Summary

As a tree grows, its lignification proceeds, which results in the decrease of respiration per unit stem volume of the tree. In this paper it is intended to construct a growth model based on the assumption that tree respiration is proportional to its stem surface area and use the model in simulation. The model was verified using data which were taken from permanent plots in the Tokyo University forest, Chichibu.

Though the growth process of many living things has been described successfully under the hypothesis that their increments are represented as the difference between assimilation and respiration, there are few models under consideration where tree respiration is not proportional to its stem volume or weight.

Therefore, the authors tried to construct a new tree growth model in which the growth process is represented logically and reasonably as the difference between assimilation and respiration. Further, summing the growth of trees in a stand, we derived a tree-distance-independent type of stand growth model.

To derive the model, the following assumptions were made.

1. Stem volume and stem surface area of a tree are described as a function of height and DBH based on the Yamamoto-Schmacher equation. The surface area equation has the same dimension for its height term and 1 dimension fewer for its diameter term in comparison with the volume equation.

2. The DBH increment of any tree in a stand at each age shows a linear relationship with the corresponding DBH at the beginning of the growth period or measurement interval.

3. The height increment of any tree in a stand at each age is constant regardless of the corresponding height at the beginning of the growth period or measurement interval.

4. A tree will die when its volume growth calculated from the growth equation derived from assumptions 1, 2 and 3 is below zero.

5. When the DBH increment of a tree derived from assumption 2 is apparently below zero, the real DBH increment remains at zero and the height increment decreases in compensation.

6. The term of the surface area in the volume growth equation derived from assumptions 1, 2 and 3 is the term of respiration. The sum of the volume growth and the respiration is the gross assimilation. The gross assimilation is constant in a stand regardless of its age. There are two major features of this model; one is that the stem surface area per unit area does not exceed a certain limit for the stand, but the volume per unit area continues increasing by decreasing the number of trees through self-thinning; the other is that this tree-distance-independent type of stand growth model systematically integrates stand level growth and tree level growth, and also several growth elements such as DBH



increment, height increment and the death of trees in a stand.

First, the paper examined the stem volume and surface area equations and determined their parameters. Then the growth of a real plot was simulated from the past to the present using the model with the parameters estimated and the results were compared to the real history of growth.

Finally, the growth process of trees and a stand presented by the simulation was discussed as loci on the stand density control diagram in conjunction with the  $3/2$  power law. From the assumptions above, it was possible to understand that the full density curve, which is represented as a line with a slope of  $-3/2$  on the diagram, implies that the maximum stem surface area per ground area is constant.

**Key words:** Coniferous plantation, Tree-distance-independent type stand growth model, Respiration, Surface area of stem