

第3章 林分生長モデルの構成とそのコンピューター

・シミュレーション

§3-1 まえがき

前章 §2-2 で明らかにしたように、閉鎖するまでの林分の立木は、それぞれ疎開木として無機的な環境に応じて、種に固有な生長法則にしたがっている。一方、閉鎖した林分の立木は、単木としての生長法則の外に、樹冠の接近にともなって形成される有機的な環境(閉鎖)による影響を受ける。閉鎖の進行とともに林分生長には、単木の生長の単純な和という法則性が薄らいで、次第に個体群としての生長法則が支配的となる。

§2-5 で定義した占有面積は、このような林分の閉鎖過程における各単木の有機的な環境を定量的に示すものといえる。この占有面積を媒介にして、それぞれの立木に対して樹高対直径の相対生長モデルを適用すれば、個体群の構成単位である単木の直径生長を求めることができる。同時に単木の生長の総和は、個体群である林分の生長を表わすことになる。

林分生長モデルのうち、単木をモデル構成の単位とするものは、マイクロ・モデルとも呼ばれているが、従来のこの種の林分生長モデルには、§1-2, 3 でみたように、個体と群との関係づけが明瞭にされていない。この点は、生態学的な立場からも指摘されているところである(斉藤 79 1976)。ここで導入する占有面積は、上述したように、群の中における各々の個体の相互関係を表わすものであり、こうした弱点がある程度克服されるものといえよう。

本章では、以上のような観点から 1 生長期間ごとに林分の樹高生長(単木ごとの樹高生長)→単木ごとの占有面積→単木ごとの直径生長→単木ごとの幹材積生長

という順序で、それぞれの部分モデルを結合し、単木の総和で林分生長を実現する構造の林分生長モデルを構成することにした。

§3-2 林分生長モデルの構成

前章で誘導した樹高対直径、占有面積および樹高生長の各部分モデルは、現実林の閉鎖過程に対して、それぞれ図-3.1 に示したように対応し、林分の閉鎖段階に応じたモデル林分を構成することができる。以下、林分のたどる

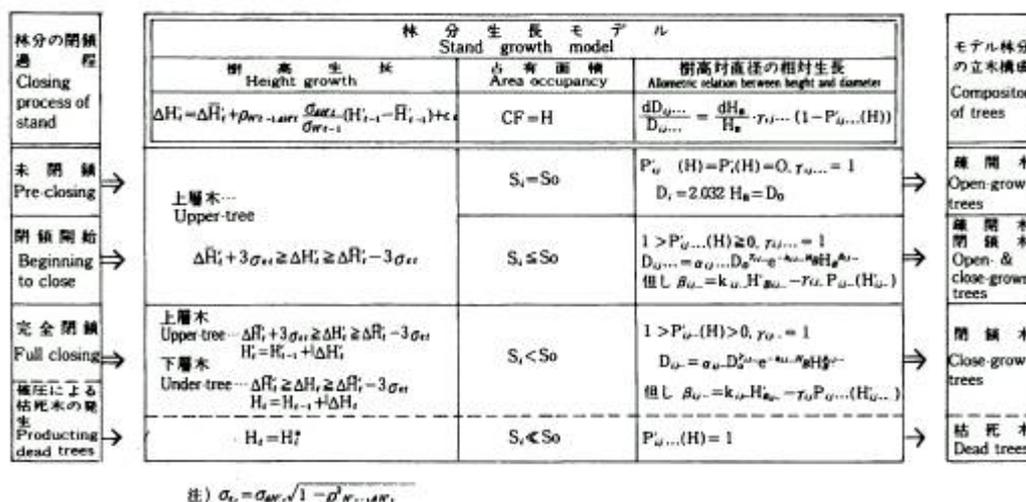


図-3.1 林分生長モデルの構造と林分の閉鎖過程との対応関係
Fig.3.1 Composition of the stand growth model and its functions according to closing process of stand.

閉鎖段階ごとに、その対応関係と、その結果実現されるモデル林分の立木構成について検討を加えてゆく。

未閉鎖段階

一般に、幼齢期の一斉人工林の立木は、それぞれ十分な生育空間を与えられ、相互に影響を及ぼし合うことなく生長する。もしこの間に、立木が被害によって生長を阻害されず、また、林床植生との種間競争は、下刈によって排除されて無視できるものとするれば、この段階の林分の樹高生長に対して、上層木の樹高生長モデルがそのまま適用される。また、林分の疎開状態は、全立木がそれぞれの有効占有面積を確保していることによって表わされる。

その結果、各立木に閉鎖度 0 の樹高対直径の相対生長モデルが適用され、それぞれの樹高に応じた胸高直径が与えられる。結局、未閉鎖段階に対応するモデル林分として、疎開木から成る林分が実現される。

閉鎖開始段階

現実林分は、立木の位置や樹高の不均一性のため、未閉鎖の立木と閉鎖した立木が混っている中間的な閉鎖段階を経る。この段階の林分に対しては、一部の立木の占有面積がそれぞれの有効占有面積以下に制限されている閉鎖状態のモデル林分が対応する。これらの閉鎖木に対しては、それぞれの閉鎖度に応じた直径生長に対する閉鎖効果が見込まれる。

完全閉鎖段階

上の閉鎖段階よりさらに生育の進んだ段階で、すべての立木が閉鎖の影響を受けている林分である。この段階の閉鎖林分に対しては、すべての立木の占有面積が、それぞれの有効占有面積以下となるモデル林分が対応する。

この段階の林分では、隣接木間の樹冠が接し、劣勢な立木の樹高が、隣接する優勢木の樹冠下に位置するようになり、その梢端部が被陰されて一層その樹高生長が低下する。このような被圧による樹高生長の低下を表わすために、林分の平均力枝高より低い樹高の立木が発生した場合に、上層木の樹高生長モデル(2.82)式の確率変数 ϵ_t に負の値域だけ与えるものとする。このモデルによって、この段階の現実林分に認められる下層木の発生が対応されることになる。上のような樹高の優劣差の拡大に応じて、それぞれの立木の占める占有面積が画定されて、立木間の競争関係が表わされることになる。この場合も同様に、それぞれの立木の閉鎖度が算定される。それに応じた樹高対直径の相対生長モデルが適用され、それぞれの閉鎖効果を見込んだ胸高直径が与えられる。結局、完全閉鎖段階に対応して、それぞれの空間的な位置に応じた閉鎖度の立木群からなるモデル林分が実現される。

枯死木の発生段階

さらに、生育段階の進んだ林分では、被圧を受けた一部の立木が枯死するに至る。この現象は、閉鎖度によって対応される。すなわち、モデル林分では、閉鎖度が 1 に達した立木は、その段階で枯死するものとされる。また、枯死木の占めていた占有面積は、次の生長期間から隣接する立木群によって利用されるものとして、それらの立木の閉鎖度の低下によって、その疎開効果が評価される。

以上は、無間伐林分に対するそれぞれ部分モデルの対応関係であるが、間伐林分についても、各々の単木ごとに疎開係数が導入される以外は全く同様に対応することができる。

以上のように 3 つの部分モデルの結合によって、任意の生育段階にある林分の生長を、林分生長の構成単位である単木ごとに、樹高生長と直径生長の 2 因子から記述する林分生長モデルが構成される。このモデルは『林分の樹高は、年齢と地位に応じて生長するが、個々の立木間には個体変動や隣接木による被圧などの影響によって生長に優劣差を生じる。また、各立木は、立木相互間の空間的位置関係に応じてそれぞれの占有面積を拡張し合う。この結果、各立木は、それぞれの樹高生長と占有面積に応じた直径生長を遂げる』という林分生長の構造モデルである。

各部分モデルの生態学的な意味は、それぞれの節において論述してきたところであるが、不確定要素の多い樹高生長については、stochastic-model を採用し、また直径生長に関しては、相対生長法則を理論的根拠とする deter-

表-3.1 SIMULATION MODEL OF STAND GROWTH(LARIX)の入力データ
Table 3.1 Input data to the SIMULATION MODEL OF STAND GROWTH (LARIX).

| CHAIN | Card No. | 変数名 Variable name | 意味 Meaning | データの値 Range of input data | 単位 Unit | 変数のタイプ Type of variable |
|-------|----------|--|---|---|------------------|----------------------------|
| 1 | 1 | DISTA | 植栽間隔 Planting interval | (1万/植付本数) ^{1/2} (10,000/planting number) ^{1/2} | m | 実数型 Real type |
| | | RANGX | 植付位置のずれの範囲 Range dispersed from regular planting position | 任意 (0.4)* (0.6) | " | " |
| | | RANGY | | 任意 (0.4)* (0.6) | " | " |
| | | RMORTA | 初期林分の枯損確率 Dead probability of standing tree for 5 years after planting | 任意 (15) Arbitrarily | % | " |
| | | PLOTX | プロットの辺長 Side length of plot | 計算機の機能による (20) Depend on memory capacity of computer (20) | m | " |
| | | PLOTY | | | " | " |
| | XXINI | 一様乱数の初期値 Initial value of uniform random numbers | 0 から 1 の範囲で任意 Arbitrarily over range from 0 to 1 | | " | |
| | 2 | CVHO | 初期林分の樹高分布の変動係数 Variation coefficient of height distribution in the initial stand | 任意 (30) Arbitrarily | % | 実数型 Real type |
| | | NAC | 伐期齢 Cutting age | 任意 (60) Arbitrarily | 年 yr. | 整数型 Integer type |
| MX | | 正規乱数化のための一様乱数の発生数 Number of uniform random numbers to transform into a normal random number | 4 以上 (10) Above 4 | | " | |
| 3 | HBAR | 上層木平均樹高 (5年生) Mean upper-tree height of initial stand (5 years old) | 地位に応じて選択 Depend on site index | m | 実数型 Real type | |
| 2 | 1 | CORRHG | 相関係数 ρ_{H_{t-1}, H_t} Correlation coefficient | 任意 (0.3) Arbitrarily | % | 実数型 Real type |
| | | CVDELH | 樹高生長量の変動係数 Variation coefficient of height increment | 任意 (20) Arbitrarily | % | " |
| | 2 | HBAR | 上層木平均樹高 (各年階) Mean upper-tree height in each ages | 地位に応じて選択 Depnd on site index | m | " |

* ()内は、本研究で採用した値
* Bracketed figures represent the value used in this study.

ministic-model を当て、これらを結合した本林分生長モデルは、石田²²⁾(1974)の指摘している micro-statistical-model の範ちゅうに属するものであろう。

上で述べたように、この林分生長モデルは、林分の各閉鎖段階に対応して、それぞれ図-3.1に示した立木構成のモデル林分を実現するが、その具体的な方法は、それぞれ部分モデルを組み込んだコンピューター・シミュレーションによることになる。このシミュレーションを実行するためのプログラムを組み、これを SIMULATION MODEL OF STAND GROWTH(LARIX)以下、単に SMSGL と略称すると名付けた。このシミュレーション・システムは図-3.2に示したように、初期林分の立木配置を定める CHAIH1 と以後の林分生長を実現させる CHAIN2 の2つのメイン・プログラムから構成されている。また、入力されるデータは、表-3.1に掲げたとおりである。以下このプログラムの主なシミュレータの構造について説明を加えてゆく。

§3-3 初期林分の立木配置(CHAIN1)

(1) 立木位置の決定(MAP)²³⁾

林分の立木配置は、林分構造を特徴づける重要な因子であるが、一斉人工林の立木配置の原点は、苗木の値付け

注) ()内の英字はサブルーチン名を示す

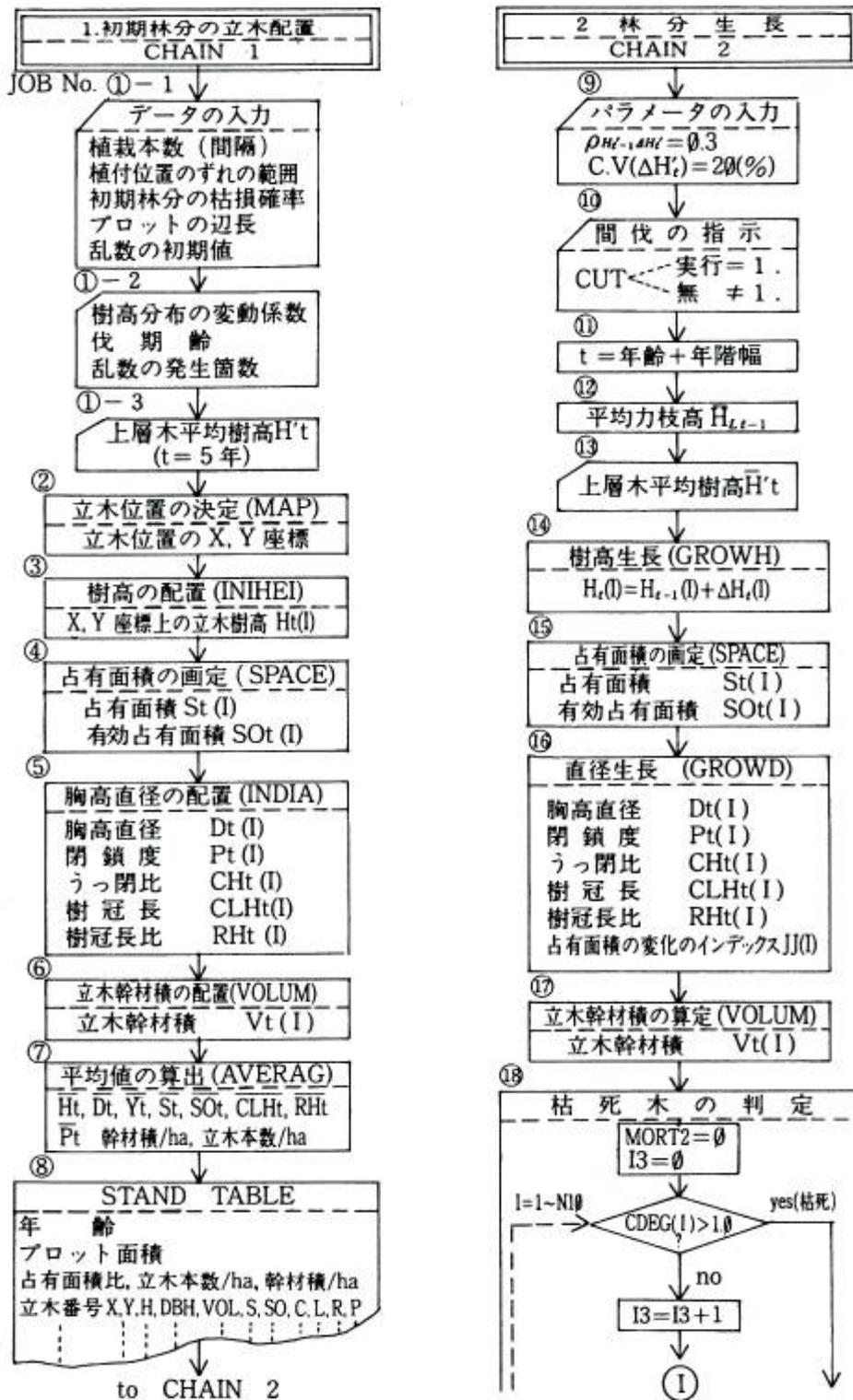
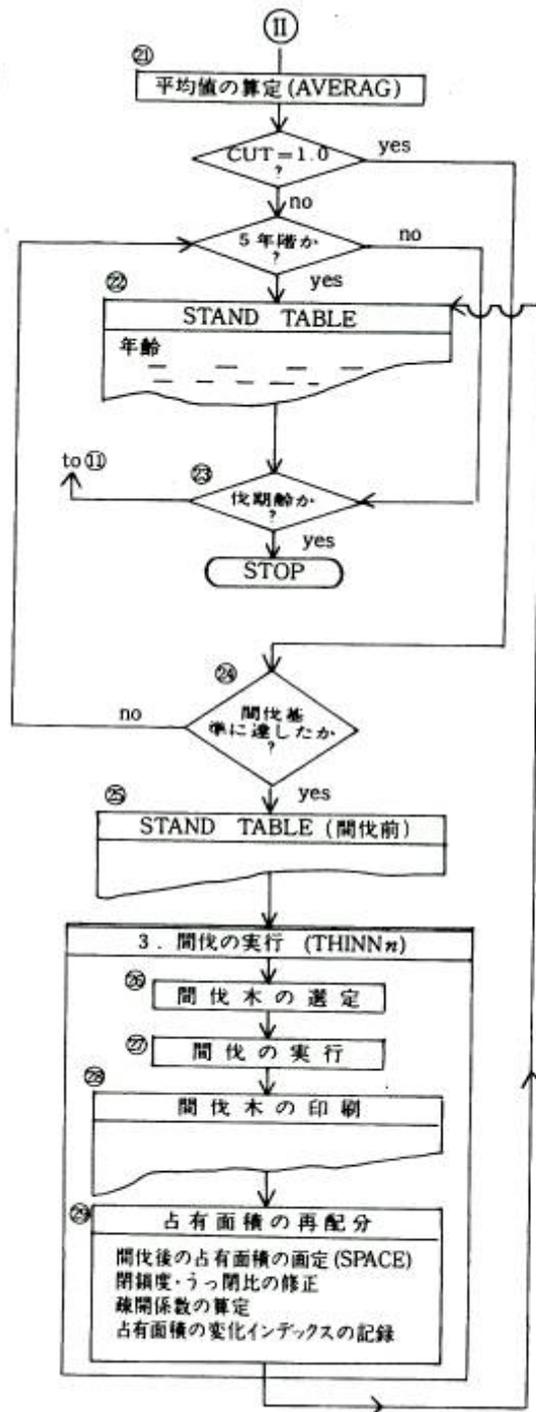
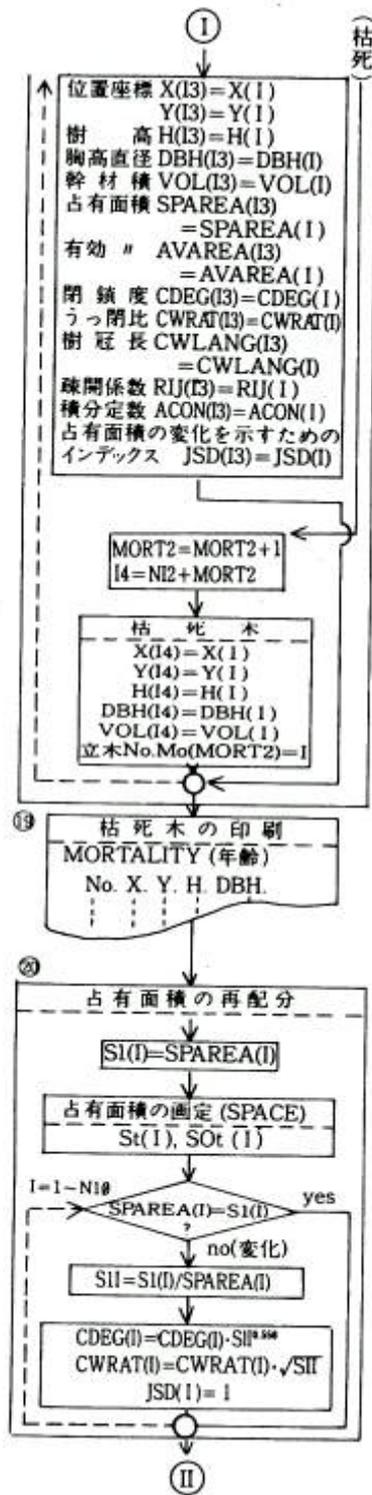


Fig.3.2 SIMULATION MODEL OF STAND GROWTH (LARIX)



られる位置によって定められる。

北海道地方におけるカラマツ人工林の地拒方式は、野鼠による食害を防除するため全刈り火入れ地拒が一般的であった。最近では山火予防や地力維持のため、火入れ地拒は後退し、全町地拒が多く行われている。しかし、潔癖な地拒が行われていることに変わりはない。

地拒された林地に苗木を植付ける場合には、単位面積当りの植栽本数によって定まる植付け間隔にしたがって、植付け列ごとに縄を張り、その縄に沿って枝などを利用した行間尺で位置を定めながら、植付けを進めていくのが標準的な作業法である。なお、多くの場合に行、列間とも等しい間隔の方形植えが採用されている。

以上のようにして植付け位置が定められるが、実際には地表上の障害物(伐根、石礫、枝条など)や地表面の凹凸などの影響で、予定された位置に正確に植付けられるとは限らない。この結果、植付け位置の測量誤差と重なって、実際に苗木の植付けられる位置は、計算上の植付け間隔からある程度ずれて、行、列ともやや不揃いを呈することがむしろ一般的である。

高田⁹⁴⁾(1967)は、カラマツおよびスギ人工林の立木位置のモデル化に際して、植栽本数から算出される間隔の植付け位置を基準点と呼び、実際に植付けられる位置は、基準点を中心にある範囲内に一様分布するとの仮定を採用した。この仮定は、上述したような植付け作業の実際面を考慮すれば、肯定されるところであり、ここでも同様な仮定をとることとした。

筆者の植栽現場での観察によれば、植付け予定地点に障害物のある場合には、その点を避けて、列方向の上または下に植付けられることが多い。また、列間縄が張ってあるため行方向のずれは列方向のずれに比べて小さくなる傾向が認められる。このような点を考慮して、行間、列間の植付け位置のずれの範囲を定め、その範囲内に植付け位置が等確率で選ばれるというモデルを採用した。

モデル林分の初期林分として、5年生の林分をとることとする。北海道地方のカラマツ人工林の生長は、5年生でおおむね1.5m~4.0mの範囲の平均樹高に達する。一般にこの期間において数回の下刈が行なわれるが、苗木の不活着、野鼠による食害、林床植生による被圧、その他の原因によって枯損木が発生し、本数減少をきたす。普通の撫育が行われている林分で、ほぼ10~20%の本数減少が見込まれる。

モデル林分の立木位置の決定に当って、上述した枯損木の発生を見込まなければならない。枯損木の位置は、その発生原因からみて、決定的に定めることは難しいので、どの立木も等しい枯損確率を有するものと考えることとする。この場合の枯損確率として、5年生に至るまでの本数減少率

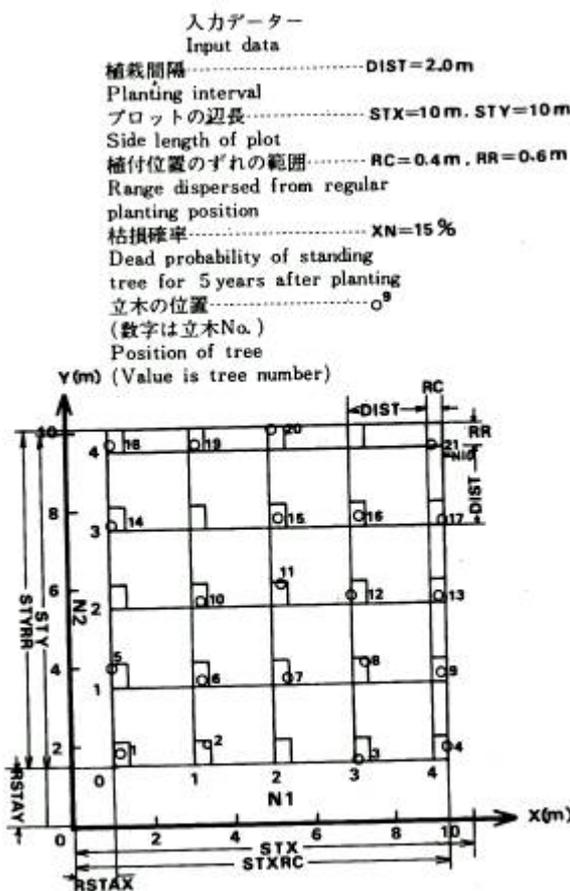


図-3.3 MAPの立木位置因子データのとり方の例
Fig.3.3 Definition of input data needed for MAP.

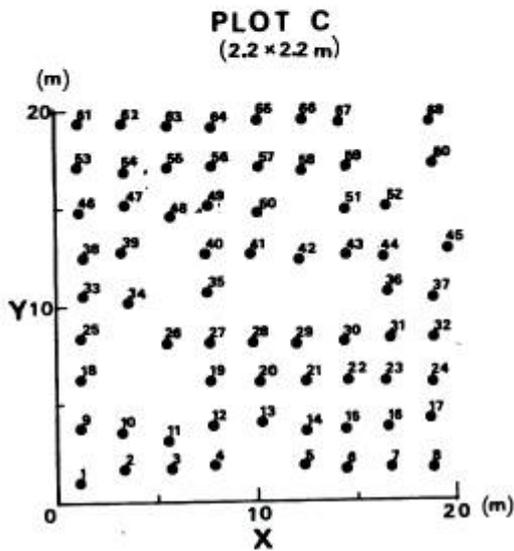
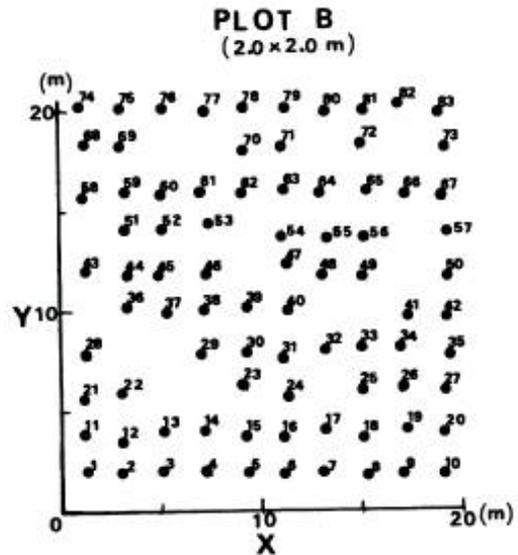
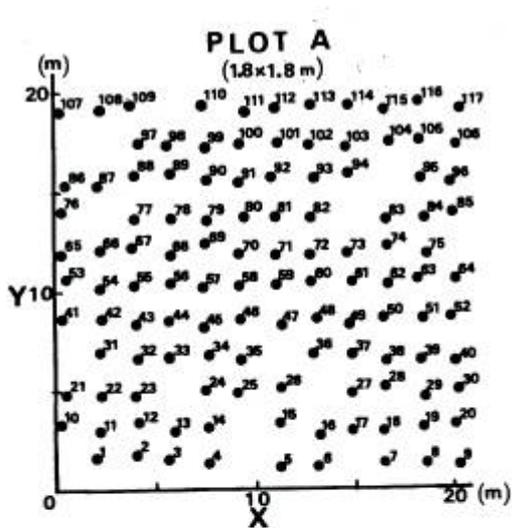


図-3.5 MAPによって実現された初期林分
(5年生)の立木位置
Fig.3.5 Initial stand map (5-years old)
simulated by the MAP.

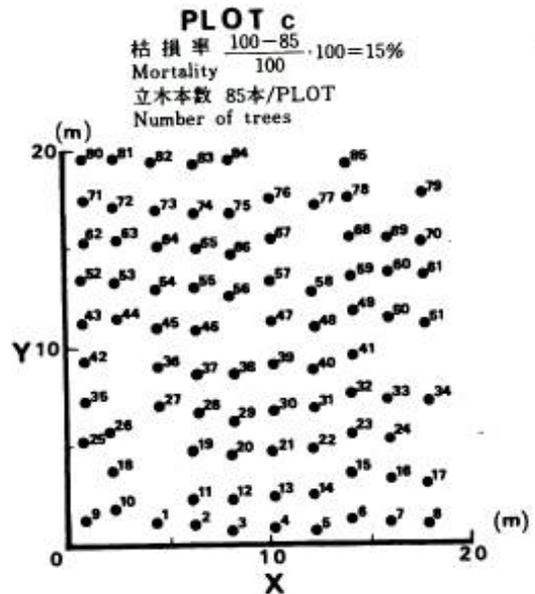


図-3.6 現実林分 (カラマツ5年生)の立木位置図
Fig.3.6 Stand map of actual 5-years old stand of *L. leptolepis*.

を与える。

以上のように初期林分の立木位置は、苗木の植付け位置と枯損木の発生位置についての確率モデルによって定めるものとし、このシミュレーションは、図-3.3の入力データを受けて、図-3.4の手順によって実行される。

ここで、植栽間隔 (DIST)、植付け位置のずれの範囲 (RC, RR) および立木の枯損確率 (XN) は、それぞれ対象とする林分によって任意に選択して与えてやることができる。ここでは枯損確率に上述した本数減少率の中間値をとり、15%を採用することにした。

図-3.5は、上のシミュレーションで実現された初期林分の立木位置図の例である。PLOT A, B, Cは、それぞれ植栽間隔が1.8m, 2.0mおよび2.2mで、辺長がともに20mの方形プロットの場合のものである。実現された立木本数は、それぞれ117本, 83本および68本となり、枯損木の数は、与えられた枯損確率での期待本数に対して、

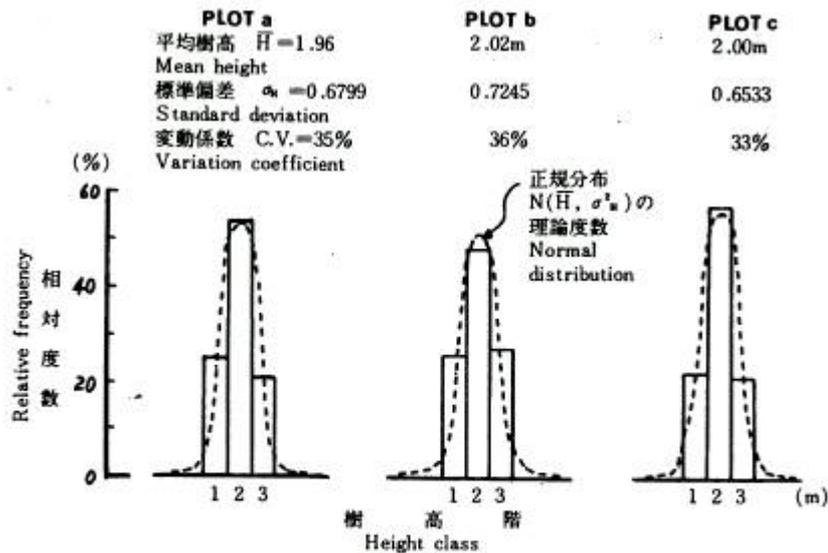


図-3.7 5年生林分の樹高分布の例
 (PLOTa,bは小木(1972)の測定値による。PLOTcは図-3.6のPLOTcの測定値による)
 Fig.3.7 Examples of the height distribution of actual 5-years old stand.

SUBROUTINE INIHEI (CVHO, MX, HOMAN)
 COMMON/BLK1/XXN, N10, N12/BLK3/H

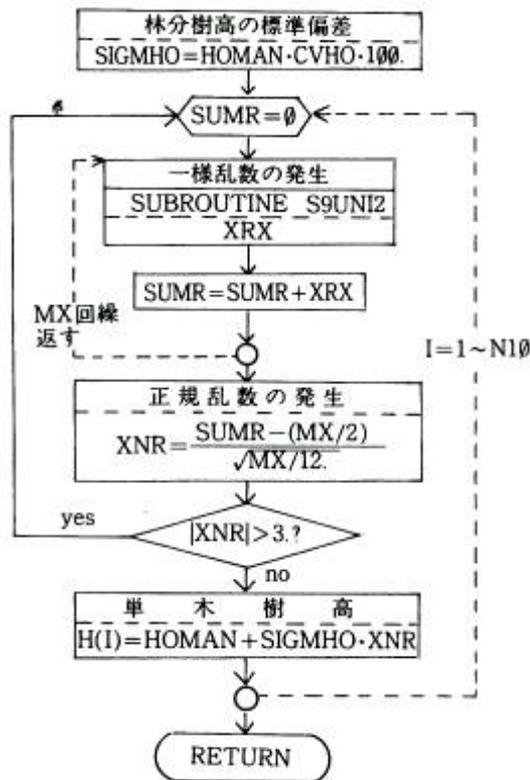


図-3.8 SUBROUTINE INIHEI の流れ図
 Fig.3.8 Flow chart of SUBROUTINE INIHEI.

PLOTAでは5本少なく、PLOTB, Cでは、それぞれ2本、1本、上回って実現された。この外の試行結果を含めて、100本前後の立木の位置について、本数からの偏差は、せいぜい±10本の範囲内であった。

枯損木の位置については、部分的にやや集中して発生する傾向も見受けられるが、著しい偏りは認められない。また、図-3.6に、現実林分の10行、10列の立木位置図を掲げたが、MAPによってシミュレートされた立木位置のパターンは、これによく近似した結果がえられている。

(2) 樹高の配置(INIHEI)

(1)で定められた立木位置上に樹高を配置するサブルーチンである。5年生の林分は、未閉鎖か、あるいは閉鎖の開始段階にあって、各立木の樹高生長には、まだ閉鎖の影響が及ばないものと考えられる。図-3.7に5年生林分の樹高分布の例を示した。いずれも $\pm \sigma_H$ の範囲に分布し、ほぼ正規分布型を呈している。すなわち、この生育段階の林分は、上層木のみから構成されていることを示唆している。

ここでは、初期林分について、その樹高分布は正規分布にしたがうものとし、また、その変動係数を上例などから判断して、30%と仮定することにした。以上の前提のもので、樹高配置のシミュレーションは図-3.8 の手順で進められる。

図-3.5 の各プロットの立木位置上に上層木平均樹高が 1.76m (§ 2-6 の樹幹解析区) の場合と、立木位置が同じで地位指数 16, 20 および 24 の場合も加えて、上のシミュレーションによって初期林分の樹高配置を実現させ、それぞれの場合の樹高分布を図-2.9 に示した。

いずれの場合も、平均樹高の実現値は、入力されたパラメータの上層木平均樹高に近似した値となる。しかし、

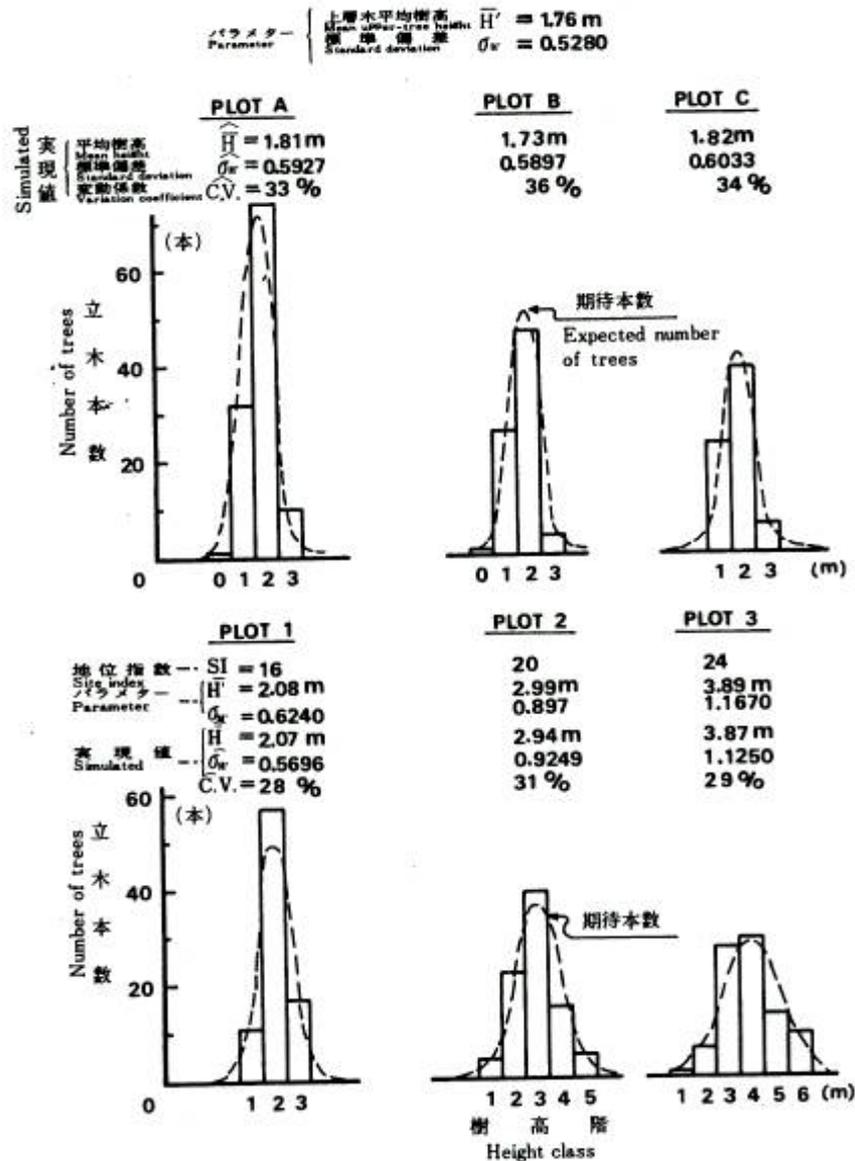


図-3.9 INIHEL によって実現された初期林分の樹高分布
Fig. 3.9 Height distribution of the initial stand simulated by the INIHEL.

その分布は、この程度の立木本数では、期待本数に対してかなり変動をともなって実現される。

(3) 占有面積の画定(SPACE)

定められた位置と樹高に応じて、それぞれの立木の確保する占有面積を画定する。まず、林縁効果を除くために、プロットの周辺木を図-3.0に示したように、相対する辺の外側に再配置させる。林縁効果は、立木の生長にともなってその範囲を拡大する

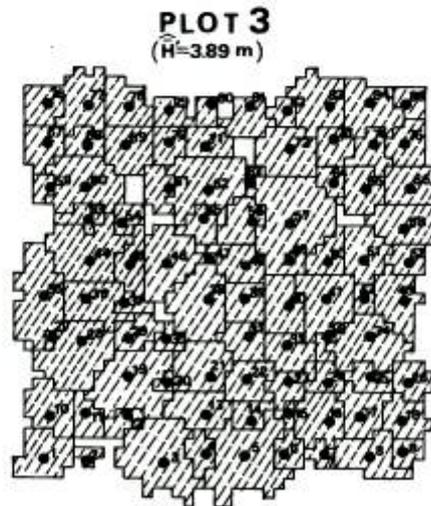
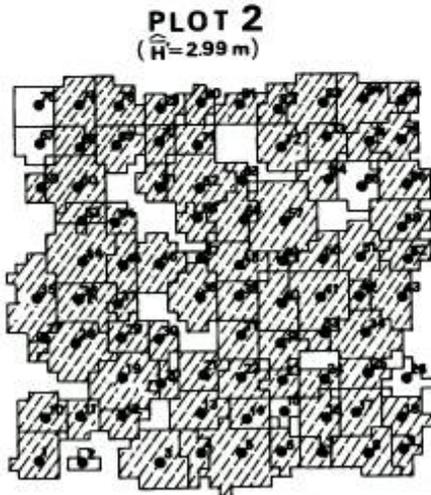
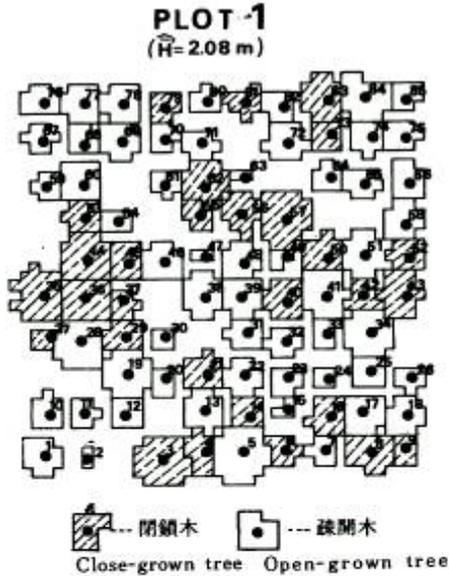


図-3.11 SPACEによって実現された初期林分の占有面積
Fig.3.11 Area occupancies simulated by the SPACE in the initial stands on three site classes.

○...対象木の立木位置 (数字は立木 No.)
Position of subject tree (Value 30(5) is tree number)
●...林縁木の立木位置 (括弧内の数字は再配置される前の立木番号)
Position of border tree (Bracketed value represents tree number in former position)

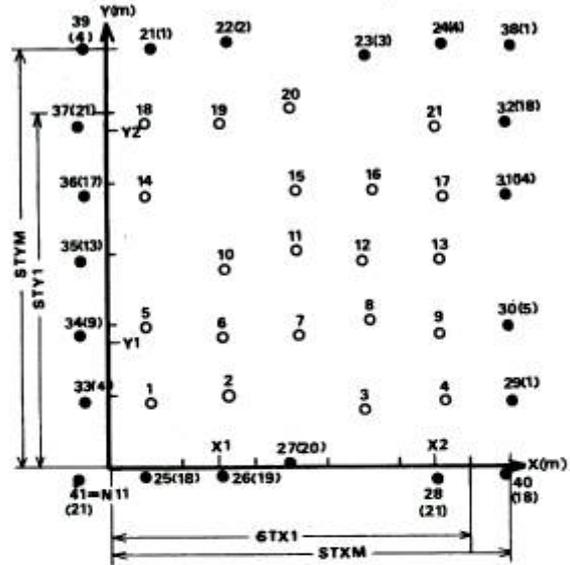


図-3.10 SPACEにおける林縁木の配置
Fig.3.10 Rearrangement of the border trees in the SPACE.

SUBROUTINE INIDIA
 COMMON/BLK1/XXN,N10,N12/BLK3/H/BLK8/P,CH,D,DLH,RH
 /BLK9/S,SO/BLK10/AI

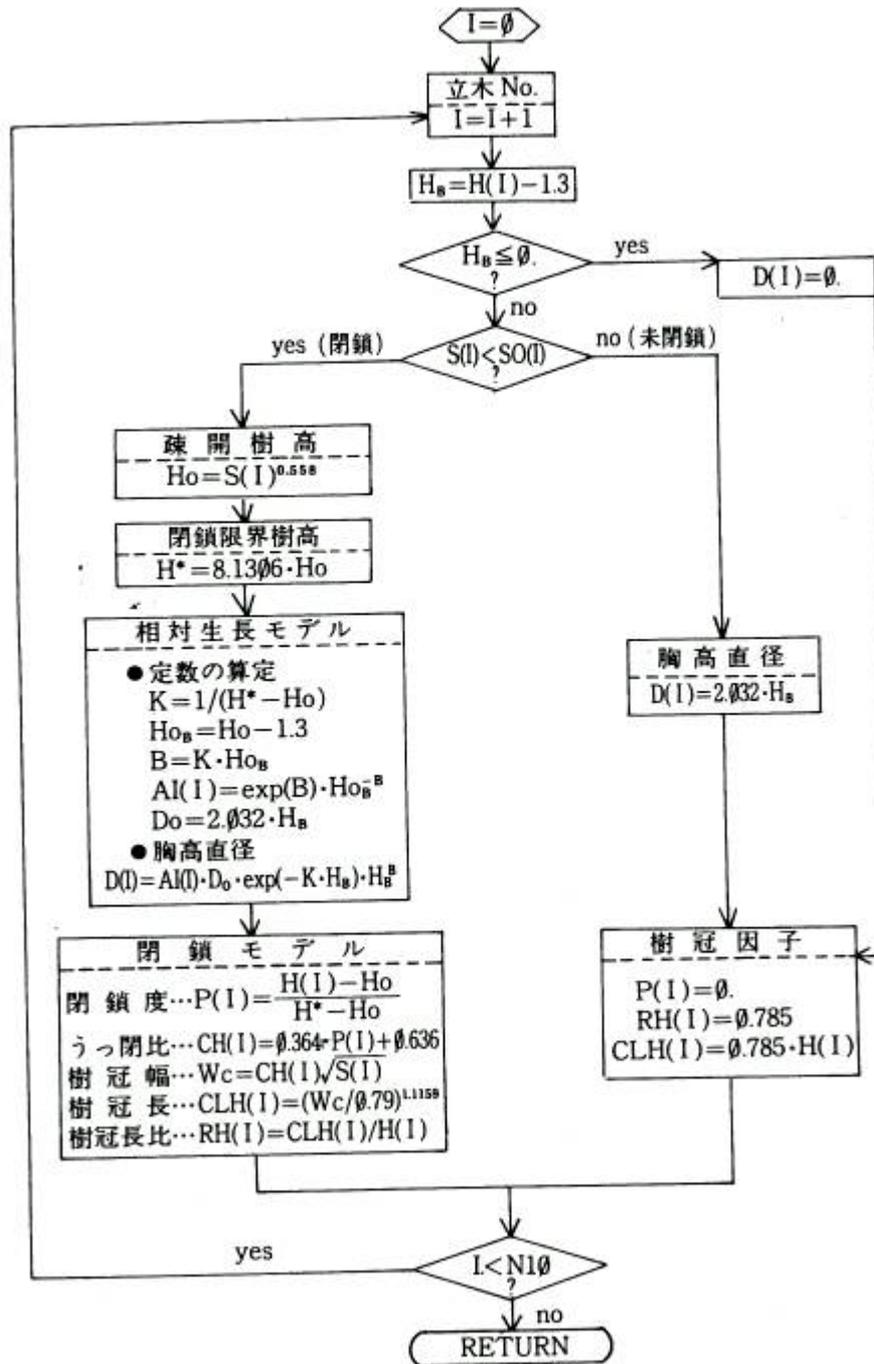


図-3.12 SUBROUTINE INIDIAの流れ図
 Fig.3.12 Flow chart of SUBROUTINE INIDIA.

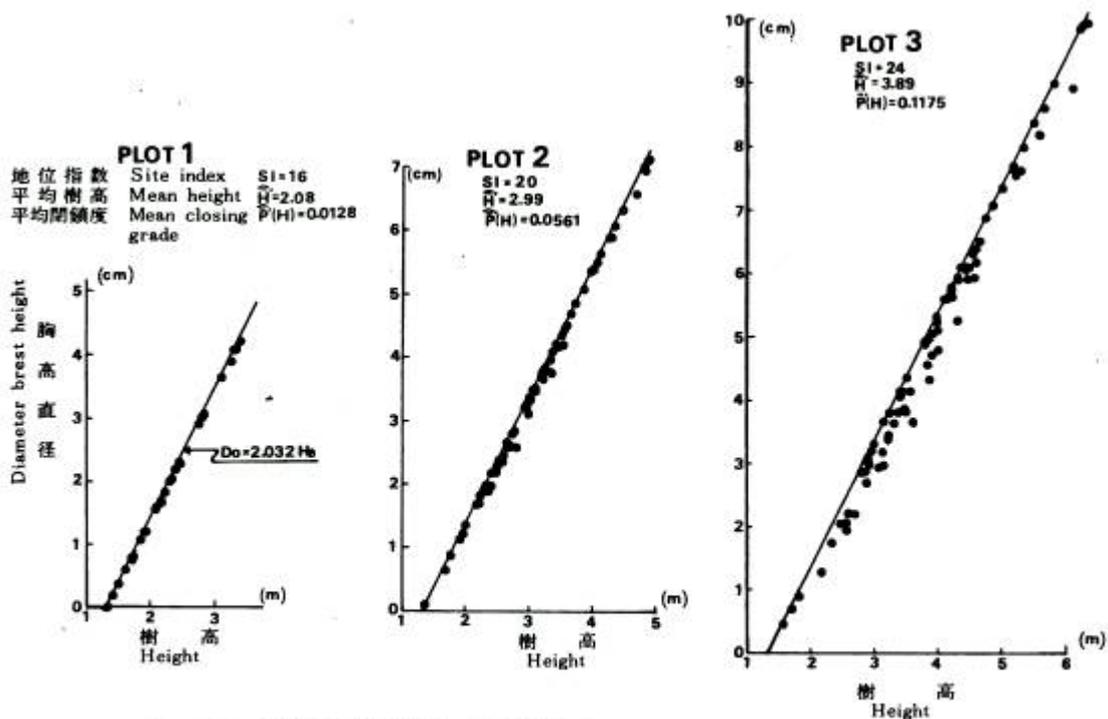


図-3.13 初期林分の樹高対直径の相対生長関係
 Fig.3.13 Allometric relations between height and diameter in the initial stand on three site classes.

ので、サブルーチンでは、10年生までは1列、11~20年生は2列、それ以上は3列の林縁木を配置する。以上の前処理について、§2-5で提示したメッシュ法によって占有面積を画定する。

図-3.11は、(2)で実現されたPLOT 1, 2, 3のそれぞれの樹高配置の場合について、サブルーチンSPACEによって画定された占有面積を示したものである。

平均樹高が2.08mに達している地位指数16の林分では、約半数の立木が、それぞれの有効占有面積を確保しており、まだ未閉鎖の段階にあることを表わしている。これに対して約2倍の樹高に達している地位指数24の林分では、全立木の占有面積がそれぞれの有効占有面積以下に制限されていて、ほぼ完全閉鎖段階に達していることを示している。また、地位指数20の林分は、両者の中間的な閉鎖段階にある。

(4) 胸高直径の配置(IMDIA)

位置と樹高および占有面積の定まった初期林分に対して、胸高直径を配置する。このための機構に、樹高対直径の相対生長モデルが当てられる。

図-3.12に示したように、立木(1)ごとのにその占有面積(S(I))が、それぞれの有効占有面積(SO(I))に等しいか、あるいは小さいかによって、未閉鎖木か、閉鎖木かを判定する。

未閉鎖木に対しては、閉鎖度を0とし疎開木と同等な相対生長関係を適用して、樹高に応じた胸高直径(D(I))およびその樹冠因子の値を与える。また、閉鎖木に対しては(2.48)式の相対生長モデルを適用して胸高直径(D(I))を与える。さらに、閉鎖度(P(I))、その他うっ閉比(CH(I))、樹冠長比(RH(I))などの樹冠因子の値を算出する。

立木位置、樹高配置および占有面積の定まったPLOT 1, 2, 3について、INIDIAによって実現された閉鎖木の樹高対直径の関係を図-3.3に示した。この図において未閉鎖木は、疎開木の関係直線上に位置し、閉鎖木はそれ

PLOT c

H=2.00 m

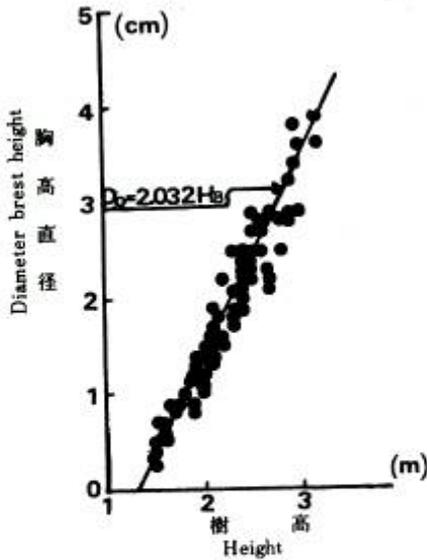


図-3.14 現実林分(カラマツ5年生)の樹高対直径の相対生長関係の例
Fig.3.14 An example of the allometric relations between height and diameter in actual 5-years old stand.

それぞれの閉鎖度に応じた閉鎖効果を受け、この直線の下位に変位する。生育段階の低い PLOT 1 では、全立木本数の 35% に当たる 30 本の立木が閉鎖しているが、林分の平均閉鎖度は 0.0128 に過ぎず、閉鎖効果は、まだわずかであることが示されている。これに対して生育段階のより進んだ PLOT 3 では、ほとんどの立木が閉鎖して、その平均閉鎖度は 0.1175 に上昇し直径生長への閉鎖効果が目立ってきている。また、PLOT 2 には、両プロットの間間的な閉鎖効果が現われている。図-3.14 は、PLOT c、すなわち地位指数 16 に相当する 5 年生の現実林分の樹高対直径の関係である。かなり変動をとまなうが、平均的には疎開木の関係直線よりやや下位に配列し、PLOT 1 の関係に近似していることが認められる。

(5) 立木幹材積の算定(VOLUM)

Table 3.2 STAND TABLE

| AGE IN YEARS | | STAND TABLE | | | | | | | | | | PLOT AREA | | | | | | | | | | |
|--------------|----------|-------------|----------|--------|----------|-----------------------|--------|----------|-----------------------|--------|----------|-----------------------|--------|----------|-----------------------|--------|----------|-----------------------|--------|----------|-----------------------|--------|
| PLOT NO | IN YEARS | NO OF TREES | DBH (cm) | HT (m) | DBH (cm) | VOL (m ³) | HT (m) | DBH (cm) | VOL (m ³) | HT (m) | DBH (cm) | VOL (m ³) | HT (m) | DBH (cm) | VOL (m ³) | HT (m) | DBH (cm) | VOL (m ³) | HT (m) | DBH (cm) | VOL (m ³) | HT (m) |
| 131 | 11 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 | 191 |
| 1 | 2 | 1.51 | 2.13 | 1.55 | 0.0075 | 1.51 | 2.75 | 0.870 | 1.06 | 0.440 | 0.923 | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1.00 | 1.36 | 2.50 | 2.58 | 0.012 | 3.75 | 4.25 | 0.048 | 1.08 | 0.448 | 0.532 | | | | | | | | | | | |
| 3 | 2.07 | 2.53 | 2.48 | 2.01 | 0.011 | 3.75 | 4.50 | 0.447 | 1.07 | 0.642 | 0.293 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 1.04 | 1.22 | 2.29 | 2.01 | 0.007 | 3.50 | 3.50 | 0.330 | 1.00 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 5 | 1.15 | 1.78 | 1.97 | 1.37 | 0.003 | 2.50 | 2.50 | 0.330 | 1.05 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 1.11 | 1.10 | 1.64 | 1.70 | 0.001 | 2.00 | 2.00 | 0.330 | 1.19 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 7 | 1.00 | 1.17 | 2.34 | 2.14 | 0.008 | 3.50 | 3.50 | 0.330 | 1.04 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 8 | 1.07 | 1.13 | 2.35 | 2.14 | 0.008 | 3.75 | 3.75 | 0.330 | 1.05 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 9 | 2.18 | 1.05 | 1.28 | 1.00 | 0.000 | 1.25 | 1.25 | 0.330 | 1.00 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 10 | 1.18 | 1.30 | 2.34 | 2.04 | 0.008 | 2.25 | 3.50 | 0.611 | 1.29 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 11 | 2.11 | 2.97 | 3.12 | 3.71 | 0.009 | 6.00 | 6.00 | 0.330 | 2.05 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 12 | 1.00 | 1.54 | 1.11 | 1.00 | 0.000 | 1.75 | 1.75 | 0.330 | 1.07 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 13 | 1.09 | 2.10 | 2.22 | 1.84 | 0.004 | 2.50 | 3.25 | 0.533 | 1.35 | 0.807 | 0.047 | | | | | | | | | | | |
| 14 | 1.08 | 3.11 | 1.42 | 1.26 | 0.003 | 2.50 | 2.50 | 0.330 | 1.51 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 15 | 1.28 | 3.33 | 1.49 | 1.39 | 0.000 | 1.25 | 1.25 | 0.330 | 1.17 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 16 | 1.04 | 2.80 | 1.10 | 1.00 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.330 | 1.04 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 17 | 1.04 | 2.58 | 2.51 | 2.45 | 0.011 | 4.00 | 4.25 | 0.644 | 1.73 | 0.888 | 0.221 | | | | | | | | | | | |
| 18 | 1.04 | 2.89 | 1.93 | 1.26 | 0.003 | 2.25 | 2.75 | 0.644 | 1.26 | 0.533 | 0.318 | | | | | | | | | | | |
| 19 | 1.04 | 2.99 | 2.29 | 1.97 | 0.007 | 2.70 | 3.00 | 0.555 | 1.35 | 0.900 | 0.226 | | | | | | | | | | | |
| 20 | 1.07 | 3.25 | 1.39 | 1.17 | 0.000 | 1.20 | 1.50 | 0.588 | 1.05 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 21 | 1.08 | 1.78 | 2.00 | 1.04 | 0.017 | 4.75 | 4.75 | 0.638 | 2.20 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 22 | 2.24 | 1.74 | 1.71 | 1.83 | 0.001 | 2.00 | 3.00 | 0.444 | 1.17 | 0.885 | 0.229 | | | | | | | | | | | |
| 23 | 1.10 | 1.43 | 1.58 | 1.56 | 0.001 | 1.75 | 1.75 | 0.330 | 1.24 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 24 | 1.05 | 1.94 | 1.60 | 1.78 | 0.001 | 2.25 | 2.25 | 0.330 | 1.32 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 25 | 1.14 | 1.48 | 1.11 | 1.00 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.330 | 1.28 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 26 | 1.12 | 1.10 | 1.75 | 1.00 | 0.000 | 1.50 | 1.50 | 0.330 | 1.59 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 27 | 1.00 | 1.78 | 1.73 | 1.86 | 0.001 | 2.00 | 2.25 | 0.644 | 1.17 | 0.888 | 0.243 | | | | | | | | | | | |
| 28 | 1.05 | 1.12 | 1.57 | 1.55 | 0.001 | 1.75 | 1.75 | 0.330 | 1.23 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 29 | 1.11 | 1.50 | 2.31 | 2.05 | 0.008 | 3.50 | 3.50 | 0.330 | 1.81 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 30 | 1.14 | 1.06 | 1.96 | 1.27 | 0.003 | 1.75 | 2.50 | 0.638 | 1.11 | 0.570 | 0.005 | | | | | | | | | | | |
| 31 | 1.23 | 1.92 | 2.08 | 1.59 | 0.005 | 3.50 | 3.50 | 0.330 | 1.63 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 32 | 1.13 | 1.02 | 2.01 | 1.43 | 0.004 | 2.50 | 2.50 | 0.447 | 1.33 | 0.843 | 0.289 | | | | | | | | | | | |
| 33 | 1.11 | 1.05 | 1.20 | 1.00 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.330 | 1.17 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 34 | 1.01 | 1.15 | 1.38 | 1.00 | 0.000 | 1.75 | 1.75 | 0.330 | 1.07 | 0.485 | 0.071 | | | | | | | | | | | |
| 35 | 1.23 | 1.47 | 1.38 | 1.17 | 0.000 | 1.50 | 1.50 | 0.330 | 1.08 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 36 | 1.07 | 1.07 | 1.73 | 1.08 | 0.002 | 2.00 | 2.00 | 0.330 | 1.36 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 37 | 1.05 | 1.73 | 1.36 | 1.17 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.330 | 1.07 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 38 | 1.04 | 1.44 | 1.74 | 1.31 | 0.003 | 2.25 | 2.25 | 0.330 | 1.52 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 39 | 1.15 | 1.55 | 1.29 | 1.00 | 0.000 | 1.25 | 1.25 | 0.330 | 1.01 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 40 | 1.02 | 1.38 | 2.25 | 1.92 | 0.007 | 3.00 | 3.00 | 0.447 | 1.48 | 0.558 | 0.310 | | | | | | | | | | | |
| 41 | 1.02 | 1.70 | 1.24 | 1.00 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.330 | 1.17 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 42 | 2.33 | 1.55 | 1.38 | 1.10 | 0.000 | 1.50 | 1.50 | 0.330 | 1.06 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 43 | 1.07 | 1.29 | 2.11 | 1.85 | 0.005 | 3.50 | 3.50 | 0.330 | 1.66 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 44 | 1.03 | 1.50 | 1.91 | 1.18 | 0.003 | 1.50 | 2.50 | 0.600 | 1.02 | 0.537 | 0.076 | | | | | | | | | | | |
| 45 | 1.52 | 1.18 | 1.40 | 1.24 | 0.019 | 5.25 | 5.50 | 0.644 | 2.01 | 0.692 | 0.110 | | | | | | | | | | | |
| 46 | 1.14 | 1.62 | 1.84 | 1.75 | 0.001 | 2.00 | 2.00 | 0.330 | 1.31 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 47 | 1.13 | 1.62 | 1.49 | 1.27 | 0.000 | 1.75 | 1.75 | 0.330 | 1.13 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 48 | 1.14 | 1.34 | 1.55 | 1.52 | 0.001 | 1.75 | 1.75 | 0.330 | 1.22 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 49 | 1.14 | 1.56 | 1.19 | 1.00 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.330 | 1.11 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 50 | 1.04 | 1.63 | 2.09 | 2.83 | 0.005 | 4.75 | 4.75 | 0.330 | 2.11 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 51 | 1.14 | 1.56 | 1.19 | 1.00 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.330 | 1.11 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 52 | 1.04 | 1.70 | 1.93 | 1.27 | 0.003 | 2.50 | 2.50 | 0.330 | 1.51 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 53 | 1.02 | 1.04 | 1.86 | 1.13 | 0.002 | 2.25 | 2.25 | 0.330 | 1.46 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 54 | 1.02 | 1.10 | 1.40 | 1.02 | 0.001 | 1.75 | 1.75 | 0.330 | 1.28 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 55 | 1.04 | 1.29 | 1.84 | 1.31 | 0.001 | 2.50 | 2.50 | 0.330 | 1.13 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 56 | 1.07 | 1.41 | 2.44 | 2.32 | 0.010 | 3.50 | 3.50 | 0.330 | 1.92 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 57 | 1.17 | 1.13 | 1.04 | 1.00 | 0.000 | 1.75 | 1.75 | 0.330 | 1.74 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 58 | 1.23 | 1.03 | 1.71 | 1.83 | 0.001 | 2.25 | 2.25 | 0.330 | 1.34 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 59 | 1.14 | 1.30 | 2.00 | 1.43 | 0.004 | 3.00 | 3.00 | 0.330 | 1.57 | 0.800 | 0.063 | | | | | | | | | | | |
| 60 | 1.14 | 1.30 | 2.00 | 1.43 | 0.004 | 2.25 | 2.25 | 0.330 | 1.38 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 61 | 1.14 | 1.34 | 1.75 | 1.81 | 0.002 | 2.00 | 2.00 | 0.330 | 1.37 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 62 | 1.14 | 1.34 | 1.98 | 1.37 | 0.004 | 2.25 | 3.00 | 0.644 | 1.76 | 0.831 | 0.367 | | | | | | | | | | | |
| 63 | 1.14 | 1.55 | 1.79 | 1.99 | 0.002 | 2.00 | 2.25 | 0.447 | 1.18 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 64 | 1.14 | 1.50 | 1.70 | 1.81 | 0.001 | 2.00 | 2.00 | 0.330 | 1.33 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 65 | 1.14 | 1.97 | 2.24 | 1.93 | 0.007 | 3.00 | 3.50 | 0.447 | 1.48 | 0.555 | 0.312 | | | | | | | | | | | |
| 66 | 1.14 | 1.20 | 1.11 | 1.00 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.330 | 1.07 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 67 | 1.14 | 1.10 | 1.55 | 1.48 | 0.001 | 1.75 | 1.75 | 0.330 | 1.20 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 68 | 1.14 | 1.10 | 1.11 | 1.00 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.330 | 1.07 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 69 | 1.14 | 1.30 | 1.70 | 1.80 | 0.001 | 1.75 | 2.00 | 0.448 | 1.10 | 0.645 | 0.343 | | | | | | | | | | | |
| 70 | 1.14 | 1.14 | 1.50 | 1.41 | 0.000 | 1.50 | 1.50 | 0.330 | 1.18 | 0.785 | 0.000 | | | | | | | | | | | |
| 71 | 1.14 | 1.12 | 2.11 | 1.83 | 0.005 | 2.50 | 3.00 | 0.500 | | | | | | | | | | | | | | |

本シミュレーションでは、閉鎖モデルによって単木ごとに閉鎖にともなう樹冠の変化が追跡されるので、§2-3(2)で提示した直径生長量の垂直分布モデルを適用して、それぞれの立木のたどる閉鎖過程に応じた幹形を求めることができる。これから区分求積法によって、単木ごとのその幹材積を算出することも可能である。しかし、本シミュレーション・システムにこの機能を組み込むことは、計算機の記憶容量の上と、計算時間の制約があり不可能であった。

また現在、北海道地方のカラマツについては中島^(56)1926, 57) 1973)によって調製されている落葉松立木幹材積表が、唯一のものとして広く利用されてきている。したがって、本システムによって、シミュレートされたモデル林分の幹材積を、既往の林分調査資料や、林分収穫表などと対比する場合には、むしろこの幹材積表によって、モデル林分の立木幹材積を算定しておく方が便利である。

以上の2点から、ここでは落葉松幹材積表によって幹材積を算出した。この幹材積表は、形数法によるもので、胸高形数を樹高および直径のそれぞれ別個の実験式

$$F_H = 0.435719 + 0.515867 \frac{1}{H} + 2.481278 \frac{1}{H^2}$$

$$F_D = 0.439004 + 0.916461 \frac{1}{D} - 0.073809 \frac{1}{D^2}$$

ここで、 F_H 、 F_D は樹高および直径から求める胸高形数、 H は樹高、 D は胸高直径によって求め、両者の平均値をとり幹材積を

$$V = \frac{1}{2}(F_H + F_D) \cdot G \cdot H$$

ここで、 V は立木幹材積、 G は胸高断面積によって算定するものである。

(6) 出力

以上の(1)から(6)までのサブルーチンによって、初期林分の立木配置がシミュレートされ、これらの結果は、STAND TABLEとしてライン・プリンターによって出力される。表-3.2は、PLOT A, B, Cについて出力された初期林分のSTAND TABLEの例である。

STAND TABLEの上段3行には、年齢、プロット面積、占有比、ha当り立木本数、およびha当り立木幹材積が印刷される。4行目には立木因子の見出しが印刷され、左から順に立木番号(No.)、立木位置の座標(X(I)), Y(I))、樹高(H(I))、胸高直径(DBH(I))、幹材積(VOL(I))、占有面積(S(I))、有効占有面積(SO(I))、うっ閉比(C(H))、樹冠長比(L(H))、樹冠長比(R(H))、および閉鎖度(P(H))、の順に配列されている。その下段には、それぞれの因子の測定単位が印刷される。

6行目以下には、単木ごとに見出しに示されている因子のシミュレートされた数値がそれぞれ打ち出される。最後の行にこれらの因子の平均値が印刷されて終る。なお、うっ閉比は、未閉鎖木について便宜的に疎開木と同等の0.636としてある。

§3-4 林分生長 (CHAIN 2)

このメイン・プログラムは、CHAIN 1でシミュレートされた初期林分を、本節1で構成した林分生長モデルによって生長を遂げさせ、同時に、その過程において被圧による枯死木を判定するシミュレーション・システムである。林分生長の3つの部分モデルがそれぞれシミュレーターとして組み込まれており、樹高生長はGROWHで、占有面積はSPACEで、また直径生長はGROWDの各サブルーチンで実現される仕組みである。

なお、このプログラムには、指示を与えれば(変数CUTに1.0を与える)、間伐を実行するシステムが組み込ま

れているが、これに関しては次章で取り扱うので、ここでは、無間伐を前提として、SNSGL の主要な構造を説明してゆく。

(1) パラメーターの入力

表-3.1 に示したように、上層木樹高の生長モデルの 2 つのパラメーター $\rho_{H_{t-1}\Delta H_t}$ と樹高生長量の変動係数を入力する。

(2) 年齢の加算

上層木樹高生長のシミュレーション GROWH' の場合と同様に、30 年生に至るまでは 1 年を、31 年生以上は 5 年を加えていく。

(3) 樹高生長(GROWH)

本サブルーチンは、§ 2-6 で構成した上層木樹高生長のシミュレーション GROWH' に § 3-2 で述べた被圧による樹高生長の低下のモデル機構を新たに加えたものである。すなわち、期首の樹高が、林分の平均力枝高より低い立木については、その生長量を

$$\Delta H_t = A + B \cdot H_{t-1} - |XNR| \cdot \sigma_t$$

ここで、XNR は正規乱数

によって算定させるものである。この結果、この立木は、上層木平均樹高の生長よりも、常に低い生長を遂げることになり、次第に上層木群より離脱して、下層木化することになる。

このモデルによれば、立木密度の高い林分ほど樹冠の枯れ上がりが急なため、早い生育段階のうちから劣勢木の梢端部が、林分の樹冠層の下に位置する機会が多く、その結果、下層木化する立木も多くなる、この下層木発生の機構は、実際の林分に対しても通じる説明であろう。

(4) 占有面積の画定(SPACE)

ここでは、(3) で樹高生長を遂げた立木の樹高に応じた占有面積の画定が行なわれる。このサブルーチンは、CHAIN1 の SPACE が、そのまま引用される。

(5) 直径生長(GROWD)

林分の生長にともなう閉鎖過程の変化を、単木ごとに追跡して、その履歴に応じた直径生長を実現するサブルーチンである。樹高対直径の相対生長モデルと、樹冠因子の変化を追跡する閉鎖モデルが組み込まれており、図-3.15 に示したように、立木の閉鎖段階に応じたそれぞれのシステムによって胸高直径と樹冠因子の値が定められる。

(6) 枯死木の判定

GROWD で算定された閉鎖度(CDEG)によって、枯死木の判定が行われる。すなわち、CDEG > 1.0 の立木は被圧を受けて枯死に至ったものとし、立木から除外される。枯死木が発生した場合、見出し MORTALITY とその時の年齢をライン・プリンターで打ち出す。その下段に枯死木の立木番号、X、Y 座標の値、樹高、胸高直径および幹材積の順に印刷される。

(7) 占有面積の再配分(SPACE)

枯死木が除かれた後の林分について、再びサブルーチン SPACE が引用されて、占有面積の再画定が行われ、枯死木の占めていた占有面積は関係する隣接木に配分される。

(8) 生長の継続

年齢(IAGE)と CHAIN1 で入力した伐期齢(NAC)が比較され、年齢が伐期齢以下であれば、年齢が加算されて、伐期齢に達するまでの林分の生長を遂げさせる。

SUBROUTINE GROWD
 COMMON/BLK1/XXN,N10,N12/BLK3/H/BLK8/P,CH,D,CLH,RH,R/BLK9/S,SO
 /BLK10/Al, JJ

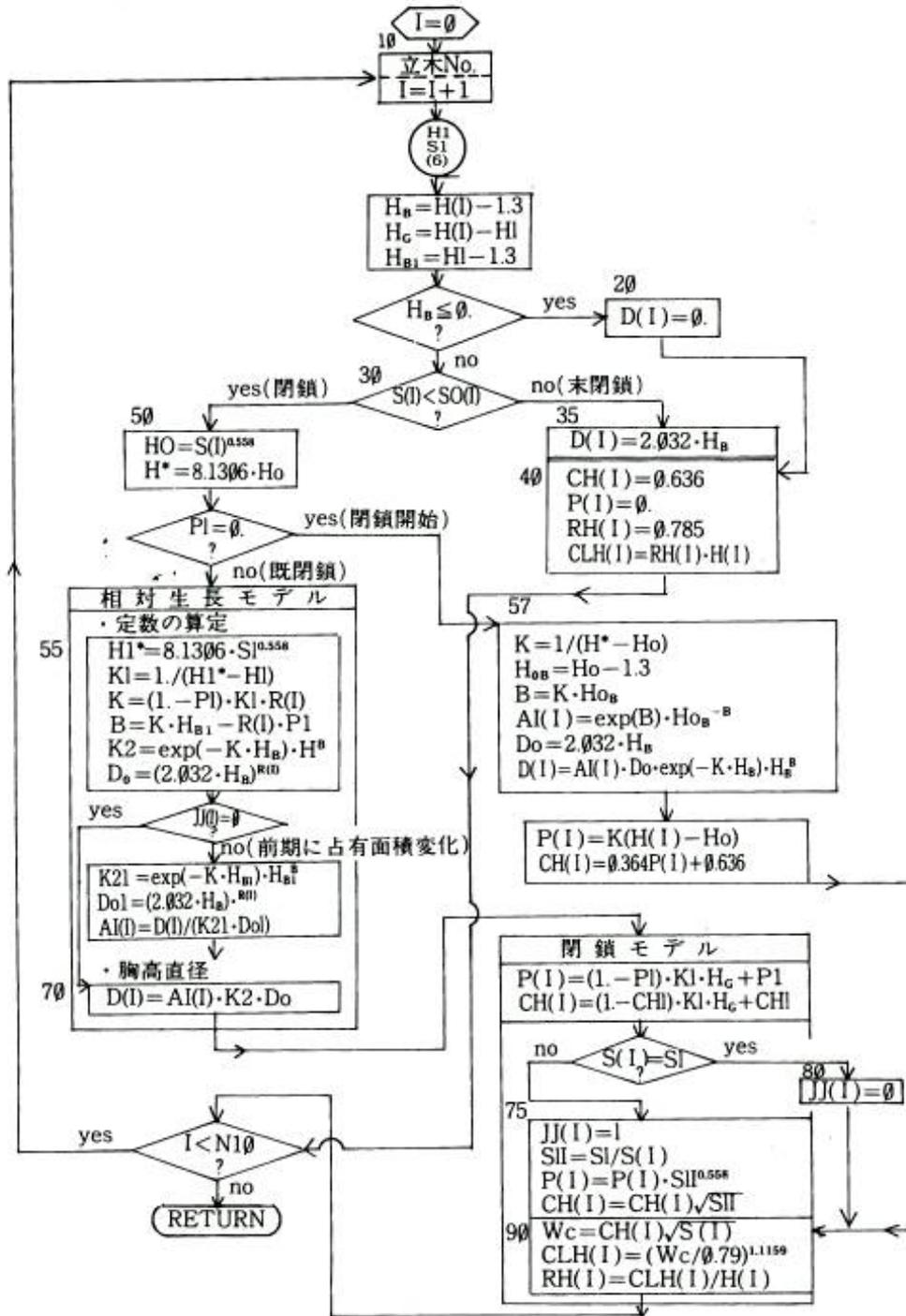


図-3.15 SUBROUTINE GROWD の流れ図
 Fig.3.15 Flow chart of SUBROUTINE GROWD.

§3-5 林分生長のシミュレーションの実行結果と考察

SMSGLによる林分生長のシミュレーションは、すでに明らかにしたように、地位と植栽間隔(ha 当り植栽本数)を任意に選択して実行することができる。ここでは、SMSGLの実行例として、§2-6 で用いた狩勝峠旧鉄道防雪林の樹幹解析区の上層木平均樹高を地位データとして入力し、1.8×1.8m, 2.0×2.0m, 2.2×2.2m の3種の植栽間隔の場合について、無間伐の条件のもとで、60年の伐期齢に達するまでシミュレーションを実行させた。

SMSGLのプログラムは、NEAC 250型電子計算機の使用を前提として、JIS 7,000レベルに相当するFORTRAN言語によって書かれている。この計算機は、辺長40mの方形プロットのデータ・サイズのSMSGLを実行できる機能をもっているが、計算機の使用時間上の制約から、辺長を20mとする方形プロットをデータ・サイズとして入力した。安定した結果をえるためには、入力する一様乱数の初期値を変えて、試行を重ねる必要がある。ここで示す実行例では、それぞれの植栽間隔について、3回の繰返しを行った。各1回の試行に約4時間の計算時間を要した。また、入力パラメータは、表-3.1の()内の数値を採用した。

初期林分の立木配置の説明のために例示したPLOT A, B, Cは、この繰返し試行のうちの1回分である。以下では、3回の繰返しをまとめて、それぞれをPLOT A, B, Cと呼ぶことにする。SMSGLによって実現された各プロットの面積と初期林分の立木本数は、表-3.3に示すとおりである。この表で面積が、プロット間で異なっているが、初期林分の立木位置の定まった後に、プロットの4辺が立木の列、行間の中央を通るようにして、プロット面積の求積を行わせているためである。このため試行回間でも面積の異なる場合が生じる。

また、立木本数は、与えられた枯損確率での期待本数に対して、各試行回を通じて最大10本の偏差をともなった。1林分内におけるこの程度の立木本数の変動は、現実林分におけるプロット調査でも常に認められる範囲のものであり、むしろ実際現象に近い結果ともみなせよう。

各試行回の出力結果をプロット別にとりまとめて表-3.4に計上した。以下、順次林分因子ごとに、シミュレートされたモデル林分の生長経過を追跡し、SMSGLの林分生長の実現機能に検討を加えてゆく。

(1) 樹高生長

各プロットの樹高生長の推移を図-3.16にまとめて示した。これから認められるように、樹高分布は、林分の生長にともなって次第に広がり、さらに下層木の発生によって、低い方向にすそを広げる傾向で推移している。これらの下層木は、PLOT Aで典型的に実現されているように、被圧を受けて順次枯死し、生長の途中で樹高分布から脱落してゆく。この結果、樹高分布は大きく広がることなく推移している。この傾向は、樹高分散の実現値でより明らかにみることができる。すなわち、各プロットの樹高分散の実現値は、枯死木の発生し始める時期までは、パラメータの上層木の樹高分散を上回る値で推移している。しかし、枯死木の発生後は、プロットによってかなりの

表-3.3 プロット別の面積と初期林分の立木本数
Table 3.3 Plot area and initial number of trees in the model unthinned stand simulated by the SMSGL.**

| 繰返し Repetition | PLOT A (18m×18m) | | | | PLOT B (20m×20m) | | | | PLOT C (22m×22m) | | | |
|-------------------|------------------|-----------------|------------------|----------|------------------|--------|---------|-----------------|------------------|----------|----------|--------|
| | 面積 | | 立木本数 | | 面積 | | 立木本数 | | 面積 | | 立木本数 | |
| | Area | 期待値 Expected | 実現値 Simulated | No./PLOT | No./PLOT | No./ha | Area | 期待値 Expected | 実現値 Simulated | No./PLOT | No./PLOT | No./ha |
| 1 | 0.0428 | 112 | 117(+5) | 2,734 | 0.0400 | 85 | 83(-2) | 2,075 | 0.0392 | 69 | 68(-1) | 1,735 |
| 2 | 0.0428 | 112 | 108(-4) | 2,523 | 0.0400 | 85 | 95(+10) | 2,375 | 0.0392 | 69 | 73(+4) | 1,862 |
| 3 | 0.0428 | 112 | 115(+3) | 2,687 | 0.0400 | 85 | 84(-1) | 2,100 | 0.0392 | 69 | 64(-1) | 1,633 |
| 計 Total | 0.1284 | 336 | 340(+4) | 2,648 | 0.1200 | 225 | 262(+7) | 2,183 | 0.1176 | 207 | 205(-2) | 1,743 |

* ()内は期待値からの偏差

* Bracketed number represents the deviation from expected number.

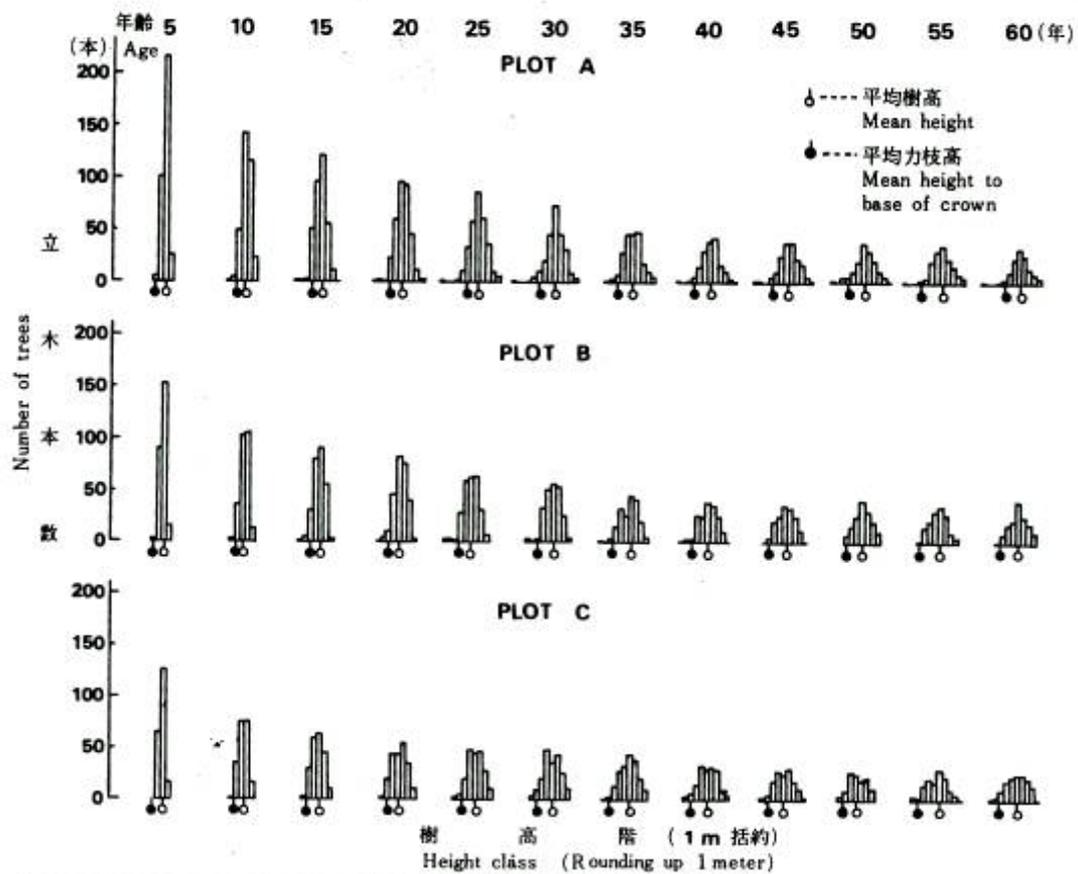
** Code of the SIMULATION MODEL OF STAND GROWTH (LARIX)

表- 3.4 SMSGL による無間伐林分の生長因子の実現値

Table 3.4 Values of the growth factors in the model unthinned stand simulated by the SMSGL.

| PLOT | 生長因子 Growth factors | | 年 Age in | | | | |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| A | 生立木 Live trees | 平均樹高(m) Mean height | 1.77 | 5.34 | 8.66 | 11.36 | 14.11 |
| | | 平均胸高直径(cm) Mean d. b. h. | 1.07 | 7.22 | 10.90 | 12.59 | 13.39 |
| | | 本数 /PLOT(本) No. of trees | 340 | 340 | 339 | 335 | 298 |
| | | /ha (本) | 2,648 | 2,648 | 2,640 | 2,609 | 2,321 |
| | | 幹材積/ha(m ³) Volume | 1 | 38 | 122 | 204 | 266 |
| | 閉鎖度 Closing grade | 0.009 | 0.256 | 0.482 | 0.657 | 0.787 | |
| | 枯死木 Dead trees | 平均樹高(m) Mean height | | 7.00 | 10.50 | 12.35 | 14.27 |
| | | 平均胸高直径(cm) Mean d. b. h. | | 4.00 | 8.75 | 10.79 | 11.80 |
| | | 本数 /PLOT(本) No. of trees | | 1 | 4 | 37 | 59 |
| | | /ha (本) | | 8 | 31 | 288 | 460 |
| 幹材積/ha(m ³) Volume | | | 0 | 1 | 22 | 38 | |
| B | 生立木 Live trees | 平均樹高(m) Mean height | 1.76 | 5.37 | 8.70 | 11.35 | 14.06 |
| | | 平均胸高直径(cm) Mean d. b. h. | 1.08 | 7.46 | 11.84 | 13.59 | 14.96 |
| | | 本数 /PLOT(本) No. of trees | 262 | 262 | 262 | 262 | 253 |
| | | /ha (本) | 2,183 | 2,183 | 2,183 | 2,183 | 2,108 |
| | | 幹材積/ha(m ³) Volume | 1 | 33 | 112 | 193 | 274 |
| | 閉鎖度 Closing grade | 0.005 | 0.218 | 0.421 | 0.579 | 0.723 | |
| | 枯死木 Dead trees | 平均樹高(m) Mean height | | | | 12.33 | 14.55 |
| | | 平均胸高直径(cm) Mean d. b. h. | | | | 10.00 | 12.55 |
| | | 本数 /PLOT(本) No. of trees | | | | 9 | 20 |
| | | /ha (本) | | | | 75 | 166 |
| 幹材積/ha(m ³) Volume | | | | | 6 | 17 | |
| C | 生立木 Live trees | 平均樹高(m) Mean height | 1.77 | 5.37 | 8.73 | 11.45 | 14.13 |
| | | 平均胸高直径(cm) Mean d. b. h. | 1.09 | 7.65 | 12.11 | 14.40 | 16.27 |
| | | 本数 /PLOT(本) No. of trees | 205 | 205 | 205 | 205 | 202 |
| | | /ha (本) | 1,743 | 1,743 | 1,743 | 1,743 | 1,718 |
| | | 幹材積/ha(m ³) Volume | 1 | 28 | 99 | 180 | 266 |
| | 閉鎖度 Closing grade | 0.002 | 0.186 | 0.368 | 0.512 | 0.649 | |
| | 枯死木 Dead trees | 平均樹高(m) Mean height | | | | 11.67 | 13.33 |
| | | 平均胸高直径(cm) Mean d. b. h. | | | | 9.67 | 11.50 |
| | | 本数 /PLOT(本) No. of trees | | | | 3 | 6 |
| | | /ha (本) | | | | 25 | 51 |
| 幹材積/ha(m ³) Volume | | | | | 1 | 4 | |

| yers | 齡 (年) | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | |
| 16.12 | 18.01 | 19.47 | 20.54 | 21.40 | 21.97 | 22.50 | |
| 14.93 | 15.83 | 16.60 | 16.93 | 17.26 | 17.51 | 17.62 | |
| 239 | 201 | 169 | 158 | 151 | 141 | 136 | |
| 1,861 | 1,565 | 1,316 | 1,231 | 1,176 | 1,098 | 1,059 | |
| 275 | 287 | 281 | 288 | 296 | 292 | 293 | |
| 0.795 | 0.845 | 0.835 | 0.822 | 0.830 | 0.826 | 0.821 | |
| | 16.45 | 18.28 | 19.00 | 19.57 | 20.50 | 21.20 | 計 |
| | 12.58 | 13.34 | 13.09 | 14.00 | 14.90 | 15.40 | Total |
| | 38 | 32 | 11 | 7 | 10 | 5 | 204 |
| | 296 | 249 | 85 | 55 | 78 | 39 | 1,589 |
| | 32 | 33 | 11 | 7 | 14 | 8 | 166 |
| 15.92 | 17.74 | 19.13 | 20.23 | 21.14 | 21.61 | 22.12 | |
| 15.67 | 16.58 | 17.26 | 17.66 | 17.93 | 18.02 | 18.08 | |
| 233 | 187 | 167 | 153 | 144 | 141 | 138 | |
| 1,942 | 1,558 | 1,392 | 1,275 | 1,200 | 1,175 | 1,150 | |
| 311 | 309 | 316 | 317 | 322 | 325 | 329 | |
| 0.793 | 0.839 | 0.826 | 0.824 | 0.823 | 0.822 | 0.833 | |
| | 16.67 | 17.80 | 19.14 | 22.00 | 22.00 | 21.33 | 計 |
| | 13.61 | 13.85 | 15.50 | 14.67 | 17.00 | 17.33 | Total |
| | 46 | 20 | 14 | 9 | 3 | 3 | 124 |
| | 374 | 166 | 117 | 75 | 25 | 25 | 1,033 |
| | 50 | 23 | 21 | 12 | 6 | 7 | 142 |
| 16.05 | 17.80 | 19.26 | 20.27 | 21.08 | 21.57 | 22.09 | |
| 17.17 | 18.00 | 18.80 | 19.21 | 19.56 | 19.74 | 19.91 | |
| 196 | 180 | 159 | 147 | 140 | 135 | 132 | |
| 1,667 | 1,531 | 1,352 | 1,250 | 1,190 | 1,148 | 1,122 | |
| 384 | 355 | 368 | 372 | 381 | 382 | 389 | |
| 0.735 | 0.798 | 0.819 | 0.823 | 0.831 | 0.834 | 0.841 | |
| | 16.56 | 17.52 | 19.67 | 20.71 | 21.00 | 20.00 | 計 |
| | 14.38 | 14.86 | 15.50 | 15.57 | 17.20 | 15.67 | Total |
| | 16 | 21 | 12 | 7 | 5 | 3 | 73 |
| | 136 | 179 | 102 | 60 | 42 | 26 | 621 |
| | 19 | 28 | 21 | 20 | 10 | 5 | 108 |



| PLOT | 年 Age in yr. 齢 | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 (年) |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| | A | 樹高 Height | 平均 Average | 1.77 | 5.34 | 8.66 | 11.36 | 14.11 | 16.12 | 18.01 | 19.47 | 20.54 | 21.40 | 21.97 |
| 分散 Variance | | | 0.3433 | 0.7745 | 1.2269 | 1.7831 | 2.2338 | 2.5405 | 2.6830 | 3.0045 | 3.2750 | 3.2314 | 3.2500 | 3.3044 |
| 歪度 Skewness | | | -0.24 | -0.14 | -0.16 | -0.24 | -0.27 | -0.51 | -0.08 | -0.14 | -0.32 | -0.24 | -0.17 | -0.30 |
| 尖度 Peakedness | | | 3.14 | 3.24 | 3.47 | 3.58 | 4.08 | 5.26 | 2.98 | 3.50 | 3.53 | 3.58 | 3.78 | 4.23 |
| 力枝高 Height to base of crown | | | 0.46 | 3.67 | 6.71 | 9.16 | 11.64 | 13.38 | 15.01 | 16.26 | 17.19 | 17.92 | 18.40 | 18.85(m) |
| B | 樹高 Height | 平均 Average | 1.76 | 5.37 | 8.70 | 11.35 | 14.06 | 15.92 | 17.74 | 19.13 | 20.23 | 21.14 | 21.61 | 22.12(m) |
| | | 分散 Variance | 0.3419 | 0.6881 | 1.0652 | 1.3817 | 1.9915 | 2.1473 | 2.6619 | 2.4746 | 2.5266 | 2.2766 | 2.5140 | 2.4604 |
| | | 歪度 Skewness | -0.05 | -0.27 | -0.34 | -0.39 | -0.34 | -0.41 | -0.29 | -0.10 | -0.07 | -0.07 | -0.05 | -0.11 |
| | | 尖度 Peakedness | 2.70 | 2.77 | 2.94 | 3.27 | 3.45 | 3.36 | 2.72 | 2.48 | 2.38 | 2.45 | 2.41 | 2.50 |
| | 力枝高 Height to base of crown | | 0.42 | 3.58 | 6.62 | 9.03 | 11.49 | 13.15 | 14.73 | 15.95 | 16.90 | 17.68 | 18.08 | 18.51(m) |
| C | 樹高 Height | 平均 Average | 1.77 | 5.37 | 8.73 | 11.45 | 14.13 | 16.05 | 17.80 | 19.26 | 20.27 | 21.08 | 21.57 | 22.09(m) |
| | | 分散 Variance | 0.3209 | 0.7810 | 1.2781 | 1.8302 | 2.1876 | 2.6019 | 2.7069 | 2.8383 | 3.1788 | 3.500 | 3.6869 | 3.6809 |
| | | 歪度 Skewness | 0.05 | -0.04 | 0.01 | -0.11 | -0.11 | -0.13 | -0.19 | -0.17 | -0.21 | -0.00 | -0.20 | -0.28 |
| | | 尖度 Peakedness | 2.53 | 2.35 | 2.32 | 2.33 | 2.60 | 2.48 | 2.59 | 2.66 | 2.44 | 2.32 | 2.52 | 2.52 |
| | 力枝高 Height to base of crown | | 0.39 | 3.32 | 5.40 | 8.89 | 11.36 | 13.07 | 14.62 | 15.89 | 16.75 | 17.44 | 17.84 | 18.29(m) |
| 上層木 Upper-tree | 平均樹高* Average | 1.76 | 5.34 | 8.69 | 11.36 | 14.02 | 15.84 | 17.48 | 18.75 | 19.71 | 20.49 | 20.95 | 21.43(m) | |
| | 分散 Variance | 0.2429 | 0.6075 | 1.0507 | 1.4595 | 1.9245 | 2.2642 | 2.6679 | 2.9813 | 3.2171 | 3.4093 | 3.5197 | 3.6370 | |

*入力データ

図-3.16 SMSGLによる無間伐モデル林分の樹高生長の推移

Fig.3.16 Simulated height growth of the model unthinned stand.

変動をとまなうが、ほぼ横ばいの傾向をたどってゆく。

以上のように、下層木の発生そして枯死という過程の繰返しを経ることによって、樹高分布の自己調節が行われ、その分布は、左右対称な正規分布型を保って推移してゆくという結果が示されている。また、下層木の枯死は、林分の平均樹高に見掛け上の生長をもたらす。そのため林分の平均樹高は、年齢の経過ともなうて、入力値の上層木平均樹高を上回り、次第にその差を開く傾向をたどっている。

上層木平均樹高は、常に閉鎖することのない理想的な疎開林分で期待される平均樹高である。これに対して実現されたモデル林分の平均樹高は、対照的に過密な立木密度での閉鎖を経過する場合のものである。したがって、この両者の間にみられる差は、林分の閉鎖過程の相違によってもたらされたものであり、立木密度の林分樹高に対する影響の仕方を端的に示しているものとみられる。

一方、プロット間の平均樹高には、初期本数密度の相違にもかかわらず、ほとんど差が認められない。これは、閉鎖の進行ともなうて、劣勢木が逐次枯死してゆき林分樹高が次第に優勢な立木によって占められるという傾向をとるためである。すなわち、優勢木の樹高生長について、林分の立木密度によって影響されないという定説と一致する結果が実現されたことになる。このことから逆説的に、SMSGLは、林分樹高生長についての実際現象を実現する機能を具備しているとみることができよう。

図-3.17 に北海道の各地の無間伐のカラマツ人工林で測定した樹高分布を例示した。これらのほとんどは植栽本数を約 3,000 本/ha とする林分で、調査時には被圧によって枯死した立木が確認されている。図上のそれぞれの林

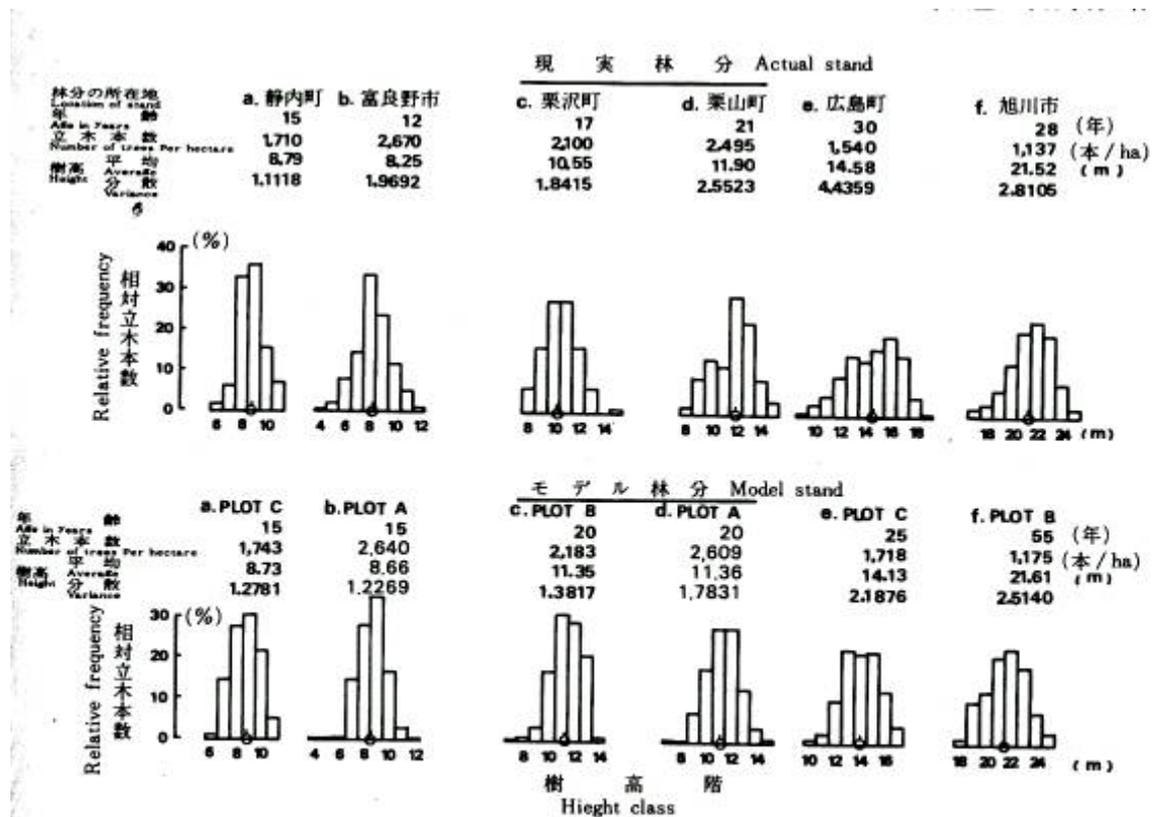


図-3.17 無間伐モデル林分と現実の無間伐林分との樹高分布の比較
 Fig.3.17 Comparison of the height distribution between simulated unthinned stand and actual unthinned stand at the same growth stage as the former.

分の下に、平均樹高および本数密度ともほぼ等しい段階のモデル林分の樹高分布を掲げた。それぞれ対応する現実林分とモデル林分の樹高分布は、細部については一致しないが、しかし、分布型およびその範囲にはかなり高い近似性が認められる。このような結果から、現実の無間伐林分の樹高分布を、モデル林分と同じパラメーターのもとで実現された1つの樹高分布ともみなすことができよう。

(2) 占有面積の推移と立木本数の減少経過

SMSGLによって出力される TREE NUMBER ON MESH POINT によって5年階ごとの占有面積図を作成した。この図によって、単木ごとに占有面積の推移をたどることができ、また同時に林分の閉鎖の進行状態を知ることができる。平均樹高が約5.5mに達する10年生の段階には、本数密度のもっとも低い林分のPLOT Cにおいても、ほとんどの立木が閉鎖して、林分はほぼ完全閉鎖段階に至っている。この段階ですでに、優勢木と劣勢木の占有面積に、はっきりとした差を生じており、以後の立木間の競争関係をきめる空間的配置がほぼ定まっている。

閉鎖後の林分における各立木の占有面積は、以降の樹高生長の優劣にともなう、若干の変化をするのが、ほぼ平衡し合って推移している。この結果、立木は相対的に占有面積を縮小されてゆき、その度合いに応じて閉鎖度の上昇をもたらされる。図-3.18は、プロット別にモデル林分の占有面積の分布の推移と、閉鎖度の関係を示したものである。この図から明らかなように、林分の生育段階の進むにしたがって、占有面積の小さい立木、すなわち劣勢木から次第に閉鎖度が高まってゆく。さらに生育段階が進むと優勢な隣接木によって被圧を受ける劣勢木が、その占有面積での閉鎖界樹高に達して枯死するに至っている。それまで枯死木の占めていた占有面積は、隣接木群によって占められ、それらの立木の閉鎖度の低下をもたらしている。その後残存する立木間に、また新たな競争関係が生まれ、再び枯死木が発生するという経過を重ねてゆく。

林分の生長過程は、以上のように多様な閉鎖履歴をたどる単木の集合されたものとしてモデル化されているが、その過程における林分の閉鎖の進行度は、その平均閉鎖度によってたどることができる。図-3.19で認められるように、林分の平均閉鎖度は、早い生育段階には直線的に上昇するが、その上昇率は PLOT A, B, C の順に大きく、本

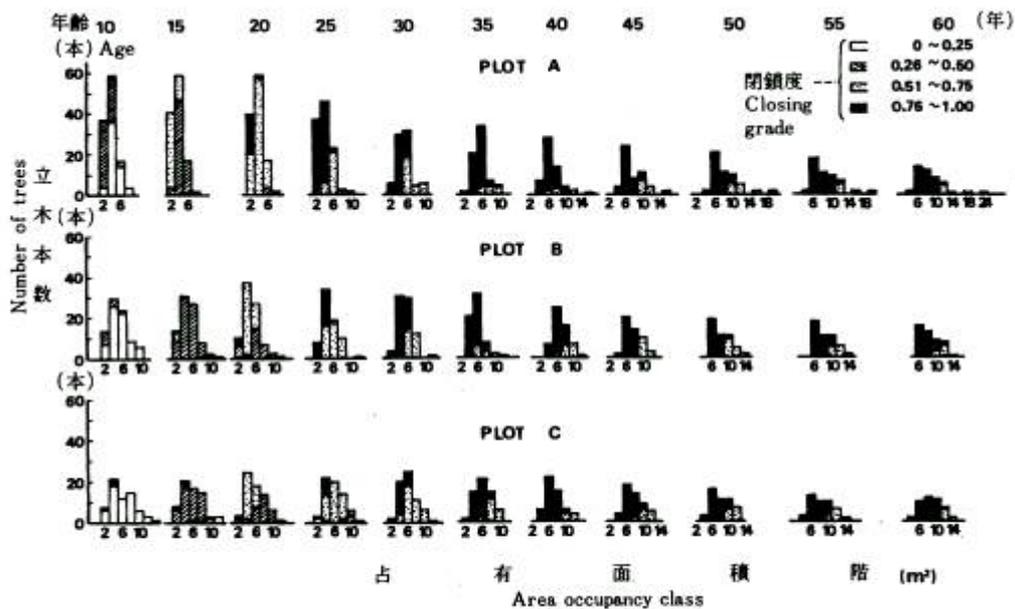


図-3.18 モデル林分内における単木の占有面積分布と閉鎖度の関係
 Fig.3.18 Transition of the frequency distribution of area occupancies and closing grades in the model unthinned stand.

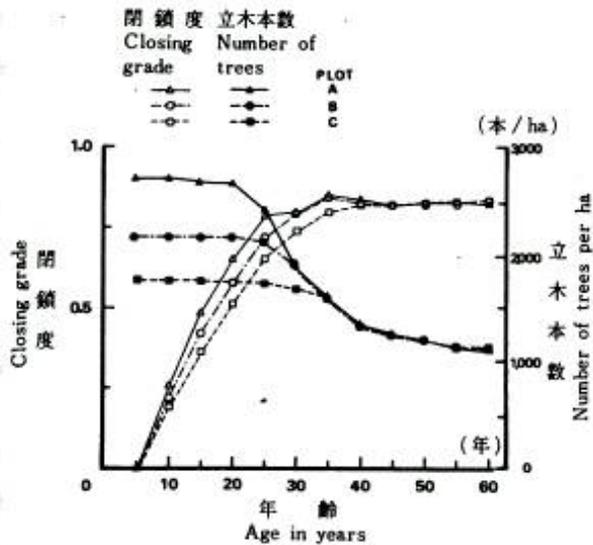


図-3.19 無間伐モデル林分の平均閉鎖度と立木本数の推移
 Fig.3.19 Transition of mean closing grade and number of trees in the model unthinned stand.

せ、ほぼ一定の平均閉鎖度を保って推移してゆく。この結果、初期本数密度の相違にかかわらず、各プロットの立木本数は、35年生の段階でほぼ等しくなり、その後はほとんど同様な本数減少の経過をたどってゆく。

吉良²⁹⁾(1957)は、被圧による枯死木の発生を、個体間の競争によって生じる自然間引現象とみて、自然間引のさかんに行われている林分では、平均個体重と平均個体密度(ρ^{-1})の間に、いわゆる $3/2$ 乗則が成立するとしている。さらに、参立木の比重を一定とし、また相似則を仮定した場合に、林分の平均樹高 (h) に対しては、 $h = K_2 \rho^{-1/2}$ が

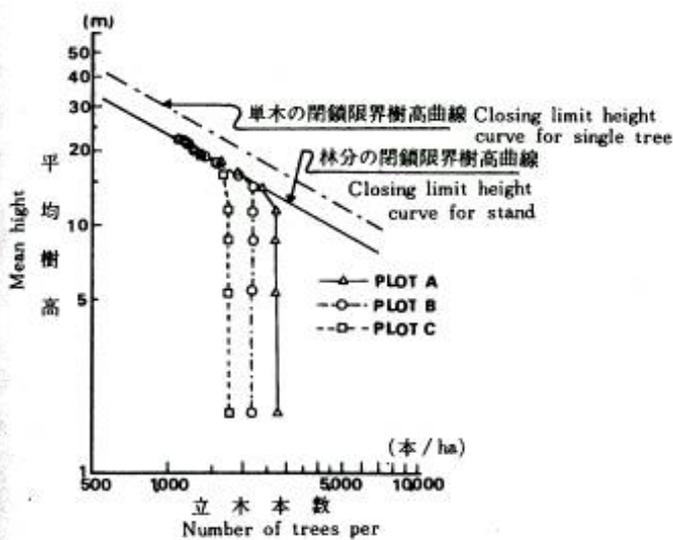


図-3.20 モデル林分の本数密度の推移と平均樹高の関係
 Fig.3.20 Transition of stand density in terms of number of trees in relation to mean height in the model unthinned stand.

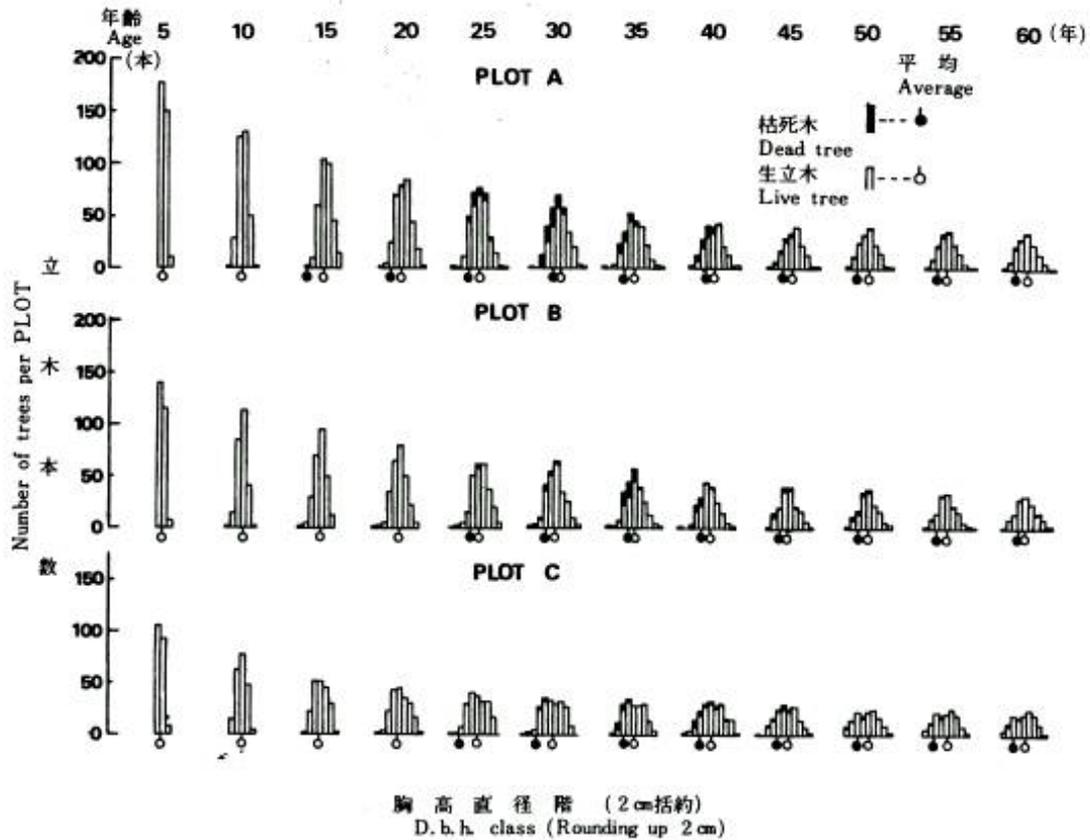
数密度の高い林分ほど閉鎖の進行が急であるという一般的な知見に一致する結果がえられている。

一方、図-3.19 に示した各プロットの立木本数の減少経過から明らかなように、被圧による枯死木は、林分の平均閉鎖度と密接に関連して発生することが認められる。すなわち、枯死木は、0.6 前後の平均閉鎖度に達した生育段階で発生し始め、その後 0.8 を超えるまでの生育期間に急増する。それ以降、林分の平均閉鎖度は頭打ち状態となり、0.82 前後の値で推移し、それ以上に上昇することはない。この段階で枯死木の発生数は、次第に減少する傾向をたどってゆく。

以上の立木本数の減少経過は、各プロットに共通してみられ、林分の平均閉鎖度が、0.8 を超える生育段階に達すると、林分の本数密度が飽和状態となり、劣勢木が逐次枯死して立木本数を減少さ

成り立つことが示されている(依田¹⁰⁶⁾ 1971)。このことはすでに、§2-3 で仮想林分について、閉鎖限界樹高と占有面積の間に近似に成り立つことを示してきた。ここでも、SMSGL によって実現されたモデル林分について $3/2$ 乗則の面から検討を加えてみる。

図-3.20 にモデル林分の各プロットについて、各年階における本数密度と平均樹高の関係を両対数グラフ上にプロットして示した。この図は、明らかに林分には、一定の本数密度の保たれる限界樹高の存在することを示している。すなわち、林分の生育段階が進み、限界樹高に近づくと、立木の枯死による本数の減少をともないながら限界樹高に達する。以後は、限界樹高に応じた本数密度を保つための本数減少が



| PLOT | 年 齡 Age in yr. | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 (年) |
|------|-------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| A | 胸高直径 D.b.h. | 平均 Average | 1.07 | 7.22 | 10.90 | 12.59 | 13.39 | 14.93 | 15.83 | 16.60 | 16.93 | 17.26 | 17.51 | 17.62(cm) |
| | | 分 Variance | 0.8642 | 2.6677 | 6.1531 | 7.6150 | 9.3643 | 10.1806 | 10.5021 | 10.9601 | 10.5868 | 10.3446 | 10.3483 | 10.9159 |
| | | 歪 Skewness | 0.61 | 0.00 | 0.35 | -0.03 | 0.13 | 0.13 | 0.24 | 0.14 | 0.13 | 0.20 | 0.23 | 0.17 |
| | | 尖 Peakedness | 2.78 | 2.70 | 3.12 | 2.88 | 2.79 | 3.00 | 2.67 | 2.75 | 2.82 | 2.93 | 3.02 | 3.01 |
| | | 枯死木平均直径 Mean d.b.h. of dead trees | | | | 4.00 | 8.75 | 10.79 | 11.80 | 12.58 | 13.34 | 13.09 | 14.00 | 14.90 |
| B | 胸高直径 D.b.h. | 平均 Average | 1.08 | 7.46 | 11.84 | 13.59 | 14.96 | 15.67 | 16.58 | 17.26 | 17.66 | 17.93 | 18.02 | 18.08 |
| | | 分 Variance | 0.8042 | 2.4162 | 4.5997 | 6.9582 | 8.8986 | 9.8622 | 10.8322 | 10.2841 | 10.3414 | 10.6063 | 10.8010 | 10.8560 |
| | | 歪 Skewness | 0.48 | -0.03 | -0.26 | -0.21 | -0.05 | -0.05 | 0.03 | 0.22 | 0.20 | 0.21 | 0.26 | 0.26 |
| | | 尖 Peakedness | 2.23 | 2.69 | 3.02 | 3.36 | 2.88 | 2.96 | 2.79 | 2.62 | 2.57 | 2.63 | 2.83 | 2.85 |
| | | 枯死木平均直径 Mean d.b.h. of dead trees | | | | | 10.00 | 12.55 | 13.61 | 13.85 | 15.50 | 14.67 | 17.00 | 17.33 |
| C | 胸高直径 D.b.h. | 平均 Average | 1.09 | 7.65 | 12.11 | 14.40 | 16.27 | 17.17 | 18.00 | 18.80 | 19.21 | 19.56 | 19.74 | 19.91 |
| | | 分 Variance | 0.9448 | 3.0125 | 6.0508 | 8.9804 | 11.6318 | 13.0282 | 14.6275 | 13.8738 | 14.2714 | 13.7429 | 15.1863 | 15.2766 |
| | | 歪 Skewness | 0.43 | 0.00 | 0.25 | 0.06 | 2.16 | 0.03 | -0.03 | -0.10 | -0.02 | -0.01 | -0.10 | -0.11 |
| | | 尖 Peakedness | 2.16 | 2.12 | 2.15 | 2.19 | 16.27 | 2.01 | 2.09 | 2.30 | 2.13 | 2.23 | 2.06 | 2.14 |
| | | 枯死木平均直径 Mean d.b.h. of dead trees | | | | | 9.67 | 11.50 | 14.38 | 14.86 | 15.50 | 15.57 | 17.20 | 15.67 |

図-3.21 SMSGLによる無間伐モデル林分の直径生長の推移
Fig.3.21 Diameter growth in the model unthinned stand.

続けられている。この結果は、無間伐林分の立木本数の減少経過に対して「初期本数密度のいかんを問わず、林分の本数密度は、一定値に収斂する」という法則性を示唆している。

SMSGGLには、単木の樹高が(2.44)式によって与えられる閉鎖限界樹高に達したとき、その立木は枯死するという枯死木の発生機構が組み込まれている。図-3.20の限界樹高は、この機構によって実現されたものである。図-3.20に単木の閉鎖限界樹高曲線を記入したが、林分の限界樹高は、これより低い樹高で実現されている。すなわち、単木の閉鎖限界樹高曲線を下方に平行移動したものとなっている。この曲線上にある林分は、吉良²⁹⁾(1975)の指摘するさかんに自然間引の行われている林分に相当し、 $3/2$ 乗則によれば、図-3.21の両対数グラフ上で勾配が $1/2$ の直線上に配列することになる。モデル林分の閉鎖限界樹高は、 $1/2$ よりやや急な勾配の直線上に配列している。この原因については、すでに§3-2で指摘したところであり、本質的な相違を示すものではない。

以上でみてきたように、SMSGGLは、単木ごとに占有面積の変化を追跡し、その拡張の度合いによって立木間の競争関係を求め、また枯死木を判定するという一連の機構によって林分の閉鎖進行過程を追跡するものである。この結果実現されたモデル林分の本数密度の減少過程には、現実の一斉林分に広く成り立つとみられている $3/2$ 乗則の成立が認められた。このことは、逆にSMSGGLによって、林分平均樹高と本数密度の $3/2$ 乗則の成立する機構を説明したともいえる。さらにまた、SMSGGLが、過密林分における立木本数の減少過程を一般的に実現する機能を有しているとみることもできる。

(3) 直径生長

各プロットの直径生長の推移を枯死木も含めて図-3.21に示した。直径分布は、樹高分布と同様に正規分布型を保ちながら次第に拡大してゆく。しかし、枯死木の発生する以降の生育段階では、ほぼ一定の分布幅で推移し、樹高と同様に林分の自然間引による分布範囲の調節作用がみられる。また、分布の分散と尖度は、プロットによってかなり変動した値を示しているが、これは林分の樹高分布と立木の配置、すなわち、林分を構成する立木の空間的な配置の相違に基づくものとみられる。

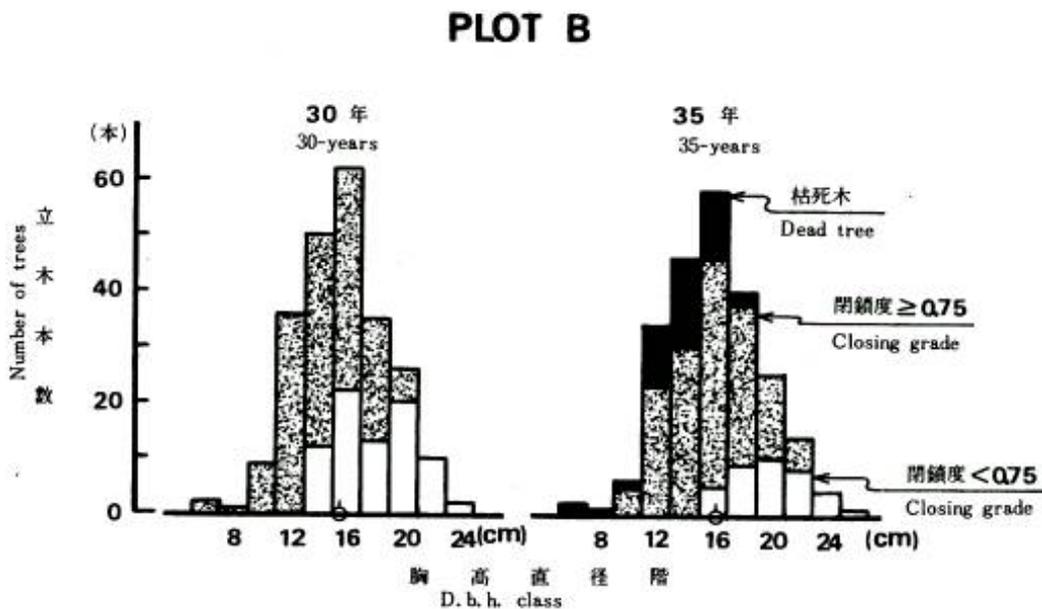


図-3.22 モデル林分の直径分布と閉鎖度の関係
 Fig.3.22 Typical example of increasing trend of the closing grade with advancing growth stage in the model unthinned stand.

四手井⁸²⁾(1956)は、高齢なスギ人工林の直径分布がマイナスの歪度をもつ例を示し、直径生長に対する立木密度効果の現われであると述べている。このような分布のゆがみは、直径の小さい劣勢な立木が、被圧によって順次枯死して分布から脱落する場合と、林分の閉鎖の進行によって直径生長量が低下し、相対的に小径木の本数の増加する場合が考えられる。図-3.21の直径分布は、上の2つの場合の中間的な変化をたどっている。枯死木の発生過程の典型的な例として、PLOT Bの30年生から35年生へ進捗する場合の直径分布を図-3.22に掲げた。この図で明らかのように、小さい直径階の立木ほど閉鎖度が高く、さらに生育段階が進むと、これらの高い閉鎖度の立木から順に枯死して分布から脱落してゆく。すなわち、被圧による閉鎖度の上昇直径生長量の低下そして枯死という過程を繰り返しながら推移する。その結果、直径分布は、常に左右対称な正規分布型が保たれてゆく。松井⁴⁸⁾(1957)は、被陰されると枯れ易い特性をもつカラマツ人工林の直径分布は、耐陰性の強いトドマツの人工林に比べて、その分散度の小さいことを指摘している。SMSGLによって実現された直径分布の推移は、このような陽樹であるカラ

マツの樹種特性を示しているとみることができる。

一方、林分の平均直径についてみると、図-3.23に示したように、その総生長量はプロットによって異なり、林分の初期本数密度の差による影響が明らかにみられる。すでにみてきたように、十分に生長が進み閉鎖限界樹高に達した段階の林分では、立木本数に林分間の差がなくなり、また、平均閉鎖度も一定となる。したがって、直径の増加率(dD/D)も林分間で差がなくなるが、過去に受けてきた閉鎖効果は、その総生長量の中に残留されているので、その差は一層開くことになる。

一方、林分の平均直径に影響を及ぼすもう1つの因子として、林分構造の相違をあげることができる。PLOT Aの平均直径は、高齢になるほど上の説明とは逆に、初期本数密度の低いPLOT B, Cに接近する傾向を示している。PLOT Aは、図-

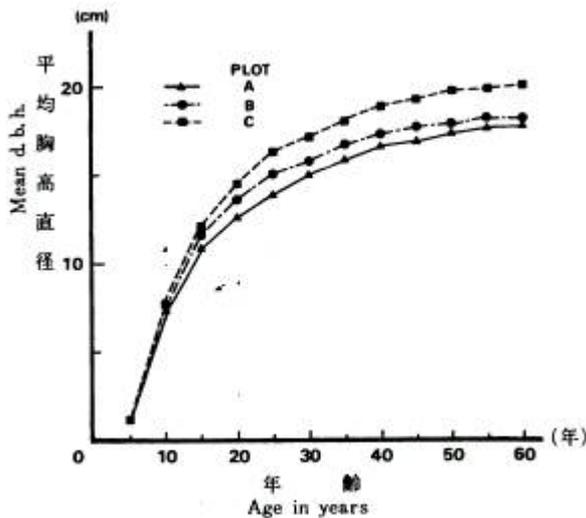


図-3.23 無間伐モデル林分の平均直径の生長
Fig.3.23 Diameter growth in the model unthinned stand.

3.21 どうかかわれるように、林分の立木配置の関係から、枯死木が劣勢な立木に集中して、他の林分比べて優勢な立木の多い林分構造となっている。このような林分構造の微妙な相違によっても、林分の直径生長に差を生じる。

図-3.24に樹高分布を比較した無間伐林分について、同様にモデル林分の直径分布と対応して掲げた。この図で認められるように、対応される林分間の直径分布は、細部にわたって一致しないが、十分な近似性がみられ、また、平均直径も有意と認められない程度の差にとどまり、両者の一致性は高い。

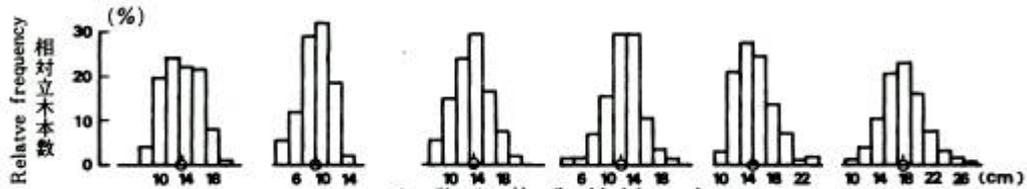
以上、直径分布の推移と、平均直径の生長経過の検討と、無間伐の現実林分との対応の結果を通じて、樹高対直径の相対生長モデルによるSMSGLの直径生長機構は、閉鎖過程に応じた林分の直径生長を実現する機能を有するものと考察される。

(4) 樹高対直径の相対生長関係

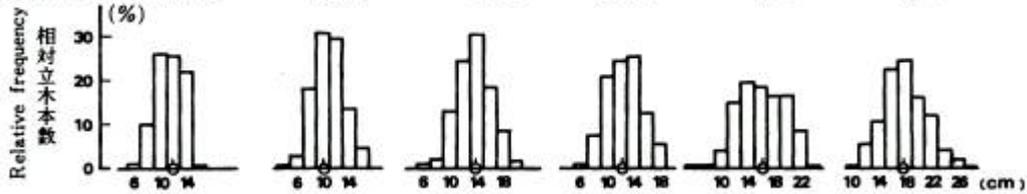
モデル林分の生長経過を樹高と直径について別個に検討し、それぞれ妥当な結果がえられていることを示した。ここではさらに、SMSGLにおける林分生長構造の基本法則として用いられている樹高対直径の相対生長関係の面から、生長にともなう林分構造の変化を追跡していくことにする。このために、図-3.25に各プロットの樹高対直

現 実 林 分 Actual stand

| 林分の所在地 Location of stand | a. 静内町 | b. 富良野市 | c. 栗沢町 | d. 栗山町 | e. 広島町 | f. 旭川市 |
|-------------------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|----------------|
| 年 Age in Years | 15 | 12 | 17 | 21 | 30 | 28 (年) |
| 平均樹高 Mean height | 8.79 | 8.25 | 10.55 | 11.90 | 14.58 | 21.52 (m) |
| 平均直径 Mean d. b. h. | 13.32 | 9.06 | 13.36 | 12.52 | 15.16 | 18.00 (cm) |
| 分散 Variance | 7.6110 | 5.3410 | 7.5523 | 8.3542 | 8.0090 | 9.9856 |
| 立木本数 Number of trees per hectare | 1,710 | 2,670 | 2,100 | 2,495 | 1,540 | 1,137 (本 / ha) |



| 年 Age in Years | 平均樹高 Mean height | 平均直径 Mean d. b. h. | 分散 Variance | 立木本数 Number of trees per hectare |
|-------------------|---------------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------|
| a. PLOT C | 15 | 8.73 | 12.11 | 6.0508 |
| b. PLOT A | 15 | 8.66 | 10.90 | 6.1531 |
| c. PLOT B | 20 | 11.35 | 13.59 | 6.9582 |
| d. PLOT A | 20 | 11.36 | 12.59 | 7.6150 |
| e. PLOT C | 25 | 14.13 | 16.27 | 11.6318 |
| f. PLOT B | 55 (年) | 21.61 (m) | 18.06 (cm) | 10.8010 |
| | | | | 1,175 (本 / ha) |



直径階 (2 cm括約)
D. b. h. class (Rounding up 2 cm)

図-3.24 無間伐モデル林分と現実の無間伐林分との直径分布の比較
Fig.3.24 Comparison of diameter distribution between simulated unthinned stand and actual unthinned stand at the same growth stage as the former.

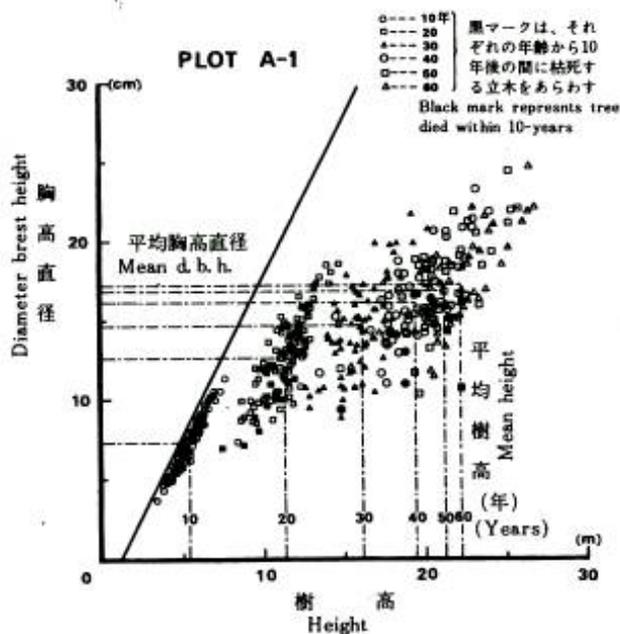
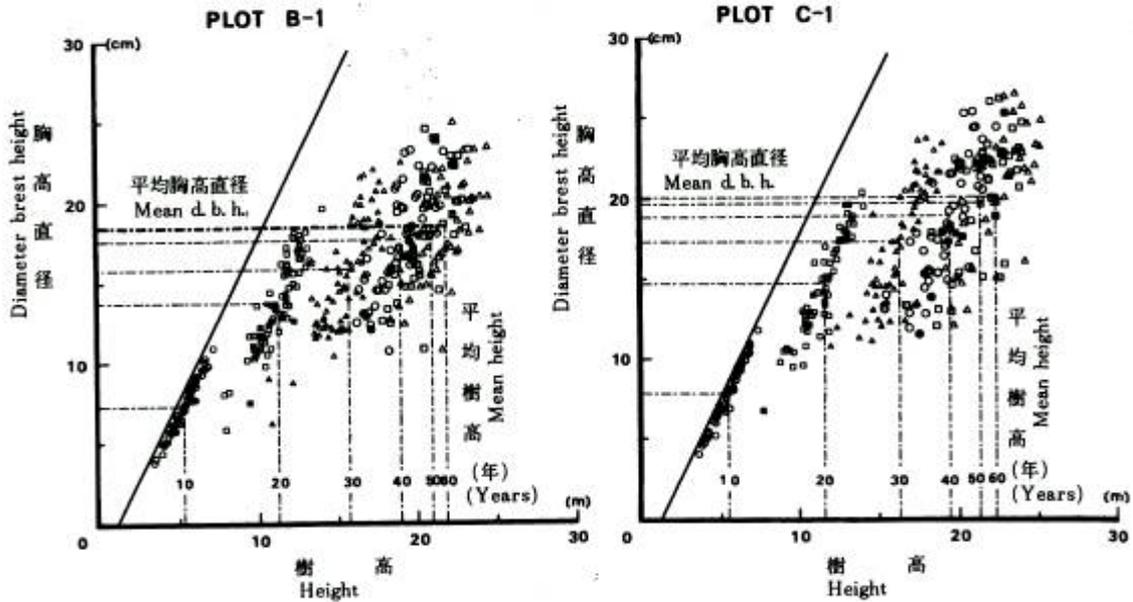


図-3.25 モデル林分の樹高対直径の相対生長関係
Fig.3.25 Transition of allometric relations between height and diameter in the model unthinned stand.

径の関係を示した。作図上の関係から、各プロットとも1回の繰返し分について10年階ごとにとどめたが、プロット全体の傾向は失われていない。

この図は、§2-3(3)において樹高、立木位置とも均一な仮想林分の樹高対直径の相対生長関係の推移を示すために用いたものである。横軸にとってある樹高の位置は、主に林分の年齢と地位によって定まり、また縦軸上の立木の胸高直径は、それぞれの立木が林分内で占める空間的位置、すなわち、樹高と占有面積によってその位置が定まるものである。この図上で林分は、年齢とともに、林分の地位と林分を構成している立木の空間的配置に応じて図の左下から右上に向って移動してゆく。すなわち、この図は、外因的条件と内因的条件に応じて生長する林分



構造の変化の過程を表わしているものである。

年齢と地位に応じて林分の生育段階が進み、林分内における各立木の空間的位置に違いが生じ、その結果、直径生長の優劣差が拡大してゆく。劣勢化した立木の一部は、その生育に必要な空間を確保できず、遂に枯死する。図-3.25の各年階で黒ぬりのマークは、その年階後の10年以内に被圧を受けて枯死する立木を示したものである。各年階でマークされた枯死木は、それぞれの立木群の左下部分の位置に多く発生するが、必ずしも決定的ではなく、枯死が競争木との相対的關係によって起きることを示している。しかし総体的には、樹高、直径とも劣勢な立木が被圧を受けて枯死し、優勢な立木によって林分が構成されてゆくという個体群の自然間引の様子が実現されている。

このような過程を経ながら、樹高と直径のそれぞれの林分平均値間の相対生長關係は、次第に図-3.25の右上位に移行してゆく。

図-3.25上で林分の初期本数密度の相違による影響は、縦軸上の位舌の差として現われている。すなわち、各年階における樹高と直径の平均値の座標は、PLOT C, B, Aの順で上位から下位に位置し、この順位はプロット間に立木本数の差のなくなる後半の年階に至っても保たれ、初期本数密度を異にする林分の閉鎖履歴の相違が示されている。

以上、SMSGLによって実現されたモデル林分について、樹高対直径の相対生長關係から林分構造の推移をみたが、実際に、このモデルの適合性を確かめるには、モデル林分と同じ条件のもとで生長を遂げた現実林分と比較対応しなければならない。しかし、いまの段階では、これを示すことはできないので、間接的な検討に頼らざるをえない。

図-3.25の樹高対直径の關係は、変数を入れ替えれば、直径(D)から樹高(H)を推定するための樹高曲線を求めるために利用される關係である。松井⁴⁸⁾(1957)は、カラマツ人工林の樹高曲線に実験的に指数曲線

$$H = ae^{\frac{D}{1.3}} + 1.3$$

がよく適合するとし、その理由に、被圧木が容易に枯死し、樹高が比較的良好揃っていることをあげている。また、河田ら²⁵⁾(1949)もカラマツ人工林の間伐試験林の樹高曲線を分析し、年齢が高くなるにしたがい、その曲線型は変化をするが、松井式と同型の指数曲線型が基本となることを明らかにしている。図-3.25のモデル林分の樹高と直径の変数を入れ替えた關係を片対数グラフ上にプロットし図-3.26に示した。この図で明らかのように、両者の

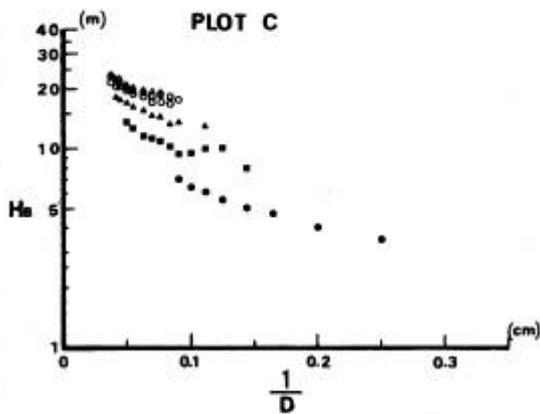
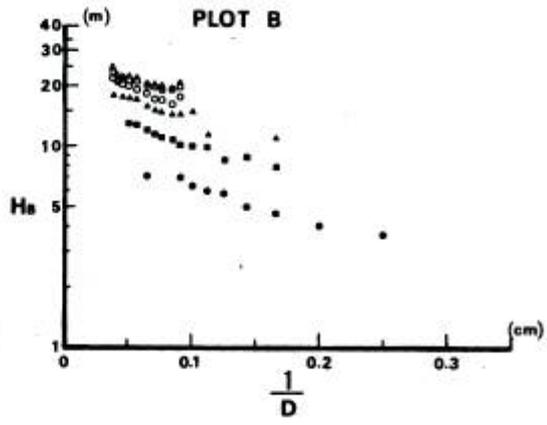
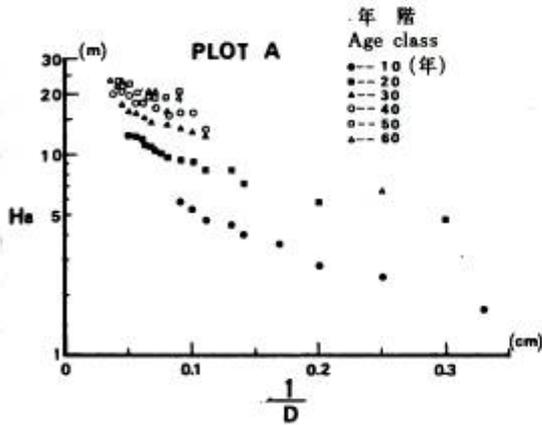


図-3.26 モデル林分の樹高曲線 $H_b = ae^{-\frac{1}{D}}$ への適合性
 Fig.3.26 Goodness of fit to height-diameter curve ($H_b = ae^{-\frac{1}{D}}$) for the model unthinned stand.

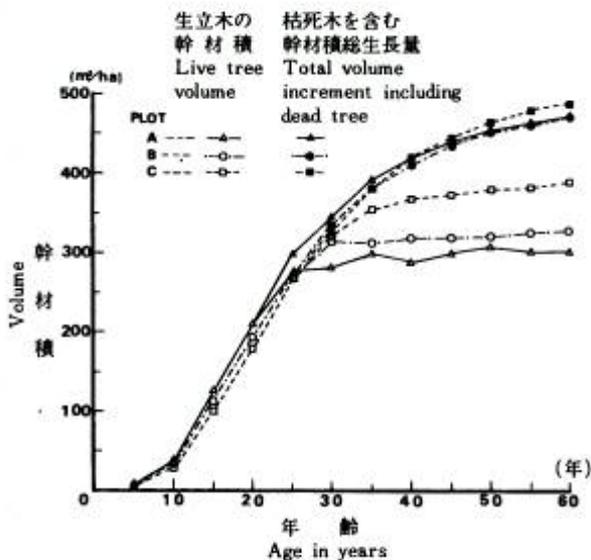


図-3.27 モデル林分の幹材積生長
 Fig.3.27 Volume development in the model unthinned stand.

関係(1/D 対 $\log H_b$)は、ほぼ直線をなし、モデル林分の樹高対直径の関係に上の指数曲線型の実験式が当てはまることがわかる。このことから、間接的ではあるが、SMSGL によって実現された樹高対直径の相対生長関係が、現実林分によく近似したものであることを理解することができよう。

(5) 幹材積生長

各プロットの ha 当り幹材積生長の推移を図-3.27 に示した。この図で明らかなように、ha 当り幹材積は、各プロットともそれぞれの閉鎖限界樹高に達するまでの生育段階では、上に凸な曲線をたどって生長し、本数密度の高い順位で推移してゆく。林分の閉鎖限界樹高に達した後は、枯死による立木本数の減少のために ha 当り幹材積の生長量は急激に低下し、ほぼ横ばい状態で推移してゆく。この場合に、初期本数密度の高い林分ほど、早い生育段階で閉鎖限界樹高に達するため ha 当り幹材積は、25~30 年生の段階でそれまでのプロット間の順位が逆転して、初期本数密度の低い林分ほど多くなる。

林分の幹材積についての $3/2$ 乗則は、 $y = k \rho^{\frac{1}{2}}$ (y は単位面積当りの幹材積)で示されている。この $3/2$ 乗則の生態学的意味は、一斉林型の林分が、一定の本数密度で達することのできる限界の林分材積であるとされ、このときの本数密度対幹材積の関係を示す曲線は、林分密度の特性曲線と呼ばれている(吉良²⁰ (1957)。この曲線式の定数

は、現存する最大密度状態にあるとみられる林分の測定値によって、経験的に定められている。四手井⁸⁴⁾ (1963) は、この曲線を最多密度曲線と呼び、その巾数に、ついて、陽性の樹種で 0.5 に近く、耐陰性の高い常緑針葉樹で 1 に近い値をとると指摘している。安藤³⁾ (1968) の調製した密度管理図で具体的に示されているように、初期本数密度の違う林分でも、十分に年齢を経ると、それぞれの生育段階に応じてある一定の本数密度に収斂し、同時に幹材積も一定の最多密度曲線上をたどるものとされている。

SMSG L によって実現された ha 当り幹材積の生長経過を、上述した $3/2$ 乗則による生長と比較するために、両対数グラフ上に本数密度と ha 当り幹材積の関係をプロットし図-3.28 に示した。この図で読み取れるように、各プロットの閉鎖限界樹高に達した時点の幹材積は、ほぼ勾配が $1/2$ の直線上に並び $3/2$ 乗則に近似的にしたがっていることがうかがわれる。しかし、その後の生育段階では、横ばい傾向をたどり $3/2$ 乗則による岐多密度林分とは異なった経過をたどってゆく。

以上の SMSG L によって実現されたモデル林分の幹材積の推移は、すでにみてきたように、初期本数密度のいかんを問わず立木本数は一定値に収斂する。また、初期本数密度の相違による立木の閉鎖効果は、直径の大きさに残留するという立木本数の減少と直径生長の 2 つの法則性によってもたらされたものである。 $3/2$ 乗則に対して、前者の法則性は、一致するが、後者は、やや異なる生長の法則性を示すものである。

§ 2-3(2) でみてきたように、立木の肥大生長は、樹冠の垂直分布によって支配される。樹高、直径ともに MITSCHERLICH 曲線型の生長法則にしたがう早生型生長のカラマツは、陽樹であるという樹種特性と相まって、閉鎖後の下枝の枯れ上がりが急である。そのため、初期本数密度の違いは、旺盛な生長期の幼、壮齢期における樹冠の垂直分布に鋭敏に影響を及ぼし、立木の幹の肥大生長に差をもたらす。初期本数密度の高い林分では、早い生育段階から被圧による枯死木が発生し、やがて、より疎な林分と同一立木本数に到達する。この生長過程において、初期本数密度

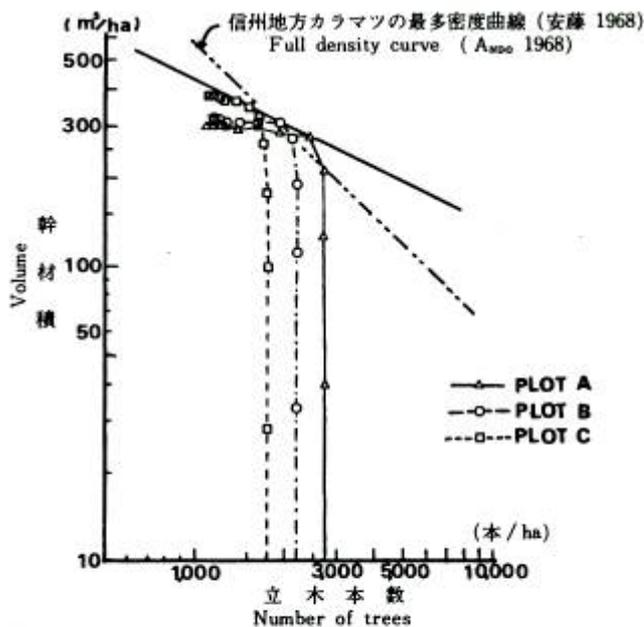


図-3.28 モデル林分の本数密度の推移と幹材積との関係
Fig.3.28 Transition of stand density in terms of number of trees in relation to stand volume in the model unthinned stand.

の相違によった樹冠の垂直分布の差は、立木本数の減少にともなう林分の一時的な疎開によって、樹冠の枯れ上がり速度が低下し、次第に解消される。しかし、樹冠は、より疎な閉鎖過程を経てきた林分とせいぜい同じ状態に回復するに過ぎない。すなわち、閉鎖限界樹高に達するまで、初期本数密度の高、林分の立木は、疎な林分に比べて、常に高い樹冠の垂直分布状態で年々の生長を重ねてきて、たとえ樹冠の垂直分布に差がなくなり、同等の肥大生長を遂げるようになっても、閉鎖履歴による差は、そのまま解消されることはない。

SMSG L では、枯死木の発生した都度、その占有面積を競争木に与えてやり、その疎開効果を閉鎖度の低下によって評価し、1 生長期ごとに樹高生長に応じた直径生長を重ねさせるという仕組みをとっており、上で考察した林分の閉鎖過程を忠実に実現させるもので

ある。

また、林分が閉鎖限界樹高に達した後は、林分の幹材生長量にほぼ匹敵する枯死木の発生が続くため、幹材積生長量は横ばい状態となり、蓄積される林分材積に限界のあることを示している。すなわち、この生育段階では、枯死木1本当りの幹材積も多くなり、一方では、林分の幹材積粗生長量が低下するため両者がほぼ平衡し純生長量が0に近い状態となっている。極限状態の立木密度のまま、林分の生育段階が十分に進んだ場合に、蓄積される林分材積が頭打ちとなることは常識的にも判断される。このことは直接確かめることはできないが、十分に成熟した天然林では、枯損木の発生のためにマイナスの生長量を示すことから類推される現象であろう。

一方、図-2.27で黒ぬりマークで示したように、モデル林分の枯死木も含めた総収積量に相当する幹材積には、プロット間に差は認められない。各プロットの地位は全く同じであり、同一地位を有する林分の幹材積総生産量は、初期本数密度のいかんを問わず同一であるという結果を示している。

§3-6 まとめ

本章では、林分生長に関する3つの部分モデルを結合して、次のような林分生長モデルを構成した。

林分の樹高生長は、年齢と地位にしたがうが、各単木の生長には、年々不確定的な個体変動がとれない、次第に単木間の樹高に優劣の差を生じる。さらに、林分の閉鎖にもなって、劣勢木の梢端部が隣接木の樹冠によって被陰されると、その立木の樹高生長は一層衰えて下層木となる(林分の樹高生長モデル)。

このような立木間の樹高生長の優劣関係によって、林分内においてそれぞれの単木が利用できる占有面積の範囲が確定する(単木の占有面積モデル)。

各単木は確保した占有面積に応じて、その樹冠を拡張する。この結果、幹部の直径は、その立木の樹高生長と樹冠の相対的な大きさ(閉鎖度)にもなった生長を遂げる(樹高対直径の相対生長モデル)。

この林分生長モデルによって林分生長を実現させるためのコンピューター・シミュレーション・システム(SMSG)を組み立てた。このシステムによって、同一地位で初期本数密度を異にする3林分を対象に、無間伐のまま60年生に達するまでのシミュレーションを実行した。この結果、次のような林分生長の経過が実現された。

樹高生長：林分の生長過程で、下層木が発生するが、これらは被圧をうけて順次枯死する結果、樹高分布は全生育期間を通じて、ほぼ正規分布型を保って推移する。実現されたモデル林分の樹高分布について、ほぼ等条件の現実林分の樹高分布と比較したが、その近似性は十分であった。また、林分の平均樹高は、林分間に差を生ぜず、林分の立木密度による相異は認められなかった。

立木本数：林分の平均閉鎖度は、本数密度の高い林分ほど早い生育段階で高まるが、いずれの林分も、平均閉鎖度が0.6前後に達すると、被圧による枯死木の発生がみられる。以後、立木本数の減少が続くが、林分の生育段階が十分に進んだ後一閉鎖限界樹高に達した後一には、その生育段階に応じた一定の立木本数に収斂する傾向が示された。この段階で林分の平均閉鎖度は一定となり、その値はほぼ0.82であった。

直径生長：林分の直径分布は、樹高の場合と同様に、正規分布型で推移する。樹高分布で比較された現実林分について、同様に対応するモデル林分の直径分布と比較した結果、満足できる近似性が認められた。一方、林分の平均胸高直径には、林分間の差が明瞭に認められ、初期本数密度の違いによる効果が、以後の直径の総生長量に残留し続けるという結果が示された。

樹高対直径の関係：樹高を横軸に、胸高直径を縦軸にとったグラフ上に、10年階ごとのモデル林分の樹高対胸高直径の関係をプロットし、林分構造の推移を分析した。両者の間には、各年階を通じて、下に凸な曲線関係が認められた。これを逆にみれば、林分の樹高曲線を求める際に利用される胸高直径対樹高の関係に外ならない。カラ

マツ人工林については、指数曲線型の樹高曲線がよく適合するといわれており、モデル林分の両者の関係も、これと同様な傾向にしたがっていることが確かめられた。

ha 当り幹材積；初期の生育段階のうち、本数密度の高い林分ほど、幹材積生長量も大きい。しかし、立木本数が一定値に収斂する段階に達した以後の林分では、生長量に匹敵する枯死木が順次発生し、林分の幹材積は頭打ち状態で推移する。この幹材積の限界値は、その林分の閉鎖履歴によって異なり、初期本数密度の高い林分ほど低い値となる。一方、枯死木の幹材積まで含めた幹材横断生長量は、林分間に差が認められず、同一地位の林分から一定期間に生産される幹材積は、初期本数密度のいかんを問わず一定であるという法則性が示唆された。

以上の SMSGL によって実現された無間伐林分の生長経過を、一斉林型の林分に広く成立する法則として認められている $3/2$ 乗則と対応し検討を加えた。その結果、モデル林分の本数密度と平均樹高の関係には $3/2$ 乗則の成立が認められたが、幹材積については、やや異なった関係が示された。この結果については、立木の幹部の肥大生長は、年々の生長量の積み重ねられたものであるという観点から、SMSGL によって実現された結果は、十分に妥当性のあるものと考察された。