

第2章 林分生長因子のモデル化

§2-1 まえがき

林業において、一般的に立木の幹部が収穫の対象とされている。したがって、森林経理学や測樹学においても主に立木の幹部が研究対象となっている。本研究でも同様に、モデル化の直接の対象を立木の幹部の生長に置くものである。

立木の幹部の生長は、2つの生長部分によってもたらされる。その1つは、直径あるいは断面積の生長によって表わされる肥大生長と、いま1つは、樹高の生長による上長生長である。肥大生長と上長生長の生理的機構は別であり、周囲の環境に対する反応も異なる(KOZLOWSKI⁴⁰1962)。したがって、モデルの構成に当っては、それぞれ異なった観点に立って取り扱い、後で有機的に両者を結合して生長モデルを構成するという手順で進めることがより原理的である。本章ではこのような立場から、直径生長と樹高生長の2つの林分生長因子について、それぞれ別な理論的根拠を求めそのモデル化の研究を進めた。

§2-2 疎開木の樹高対面径、樹冠の相対生長關係

(1) 疎開木の選定と相対生長關係

前章で定義した疎開木から構成されている林分を想定して、これを疎開林分と呼ぶ。この林分の立木は常に十分な生育空間を有していて、隣接木の影響を受けることなく、もっぱら樹種に固有な生長法則にしたがって生長を遂げるものと考えることができる。その結果、立木の各生長部分(樹高、直径、樹冠幅、樹冠長など)の相互間に一定の關係が保持されているものと推定される。一方、生育空間の制限を受けている閉鎖林分の立木は、生長部分によっては自由な生長を遂げられず、その結果立木の生長部分相互間の關係も、閉鎖の度合いすなわち立木密度の疎、密によって変わってくることになる。

立木の生長部分のうち樹高生長は、立木密度の影響を受けることが少なく、とくに林分の上層高または優勢木については、ほとんどその影響を受けないことが定説となっている(SPURR⁸⁸1952, 嶺⁵¹1955, 佐藤ら⁷⁹1955, BRAATHE⁹1957, 坂口⁸⁰1961, 西沢ら⁸⁶1966, SJOLTE⁷⁷1967, 安藤³1968)。この樹高生長の特性を利用して、他の生長部分を樹高の函数として表わし、疎開林分の立木(疎開木)の同じ關係と比較することによって、その生長部分に作用する立木密度の影響を定量的に測ることができるであろう。

疎開木についての上述の仮説を実証するには、まず疎開林分の立木の測定が必要である。しかし、実際に疎開状態にある林分はえられないので、単木を単位に次の基準によって疎開木を選定し測定の対象とした。

- 1) 十分な生育空間を有していて、隣接の立木と樹冠を交差することなく、太陽光を十分に受けて生育している立木
- 2) 幹の下部まで生枝が着生し、樹冠が正常な形を呈している立木
- 3) 瓜衝や冠雪などによる梢端部の損傷、その他の被害の跡が認められない立木

北海道の内陸部の上川、十勝地方の各地のカラマツ人工林から上の選定基準によって、幅広い樹高階にわたる26本の疎開木を選び、樹高、胸高直径、力枝高、および樹冠幅を測定し、表-2.1の結果をえた。

樹高を幹の上長方向の生長部分とみなし、また他の生長部分として、例えば幹の直径を取れば、直径は幹の水平方向の生長部分とみなすことができる。この結果、樹高と直径の關係は、立木の2つの生長部分間の相対生長(allometry, relative growth)の問題に帰着する。

表- 2.1 疎開木の測定値
Table 2.1 The measured values of the open-grown tree.

立木 番号	年 齢	胸直 径	高 径	総樹高	胸樹 高	力枝高	樹冠長	樹冠幅	地位級
Tree No.	Age in years t	D.b.h. Do	Total height H	Height above brest height H _b	Clear length Bo	Crown length Lo	Crown width Wo	Site class Sl	
	(年)	(cm)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
1	27	34.6	19.0	17.7	4.0	15.0	9.2	I	
2	26	29.7	16.0	14.7	4.0	12.0	8.0	II	
3	23	25.8	14.0	12.7	3.5	10.5	7.2	II	
4	22	31.1	16.5	15.2	3.0	13.5	6.8	I	
5	34	37.4	20.5	19.2	4.0	16.5	9.8	II	
6	17	26.0	14.5	13.2	4.5	10.0	6.8	I	
7	34	40.0	22.0	20.7	7.0	15.0	9.2	I	
8	21	28.1	15.0	13.7	4.0	11.0	6.8	I	
9	20	21.8	12.5	11.2	2.0	10.5	5.8	II	
10	12	15.1	8.0	6.7	2.0	6.0	4.6	II	
11	10	12.7	6.0	4.7	1.5	4.5	3.2	II	
12	6	7.3	5.5	4.2	1.0	4.5	3.2	I	
13	5	5.1	4.0	2.7	0.8	3.2	2.0	I	
14	7	7.7	6.0	4.7	1.2	4.8	3.0	I	
15	4	6.3	4.0	2.7	1.3	2.7	2.1	I	
16	21	29.3	14.5	13.2	2.0	12.5	7.2	II	
17	10	9.0	6.5	5.2	1.2	5.3	3.2	II	
18	11	15.0	9.0	7.7	1.5	7.5	4.6	I	
19	6	3.7	3.0	1.7	0.4	2.6	1.8	II	
20	4	2.1	2.2	0.9	0.4	1.8	1.2	II	
21	5	4.0	3.0	1.7	0.8	2.2	1.6	II	
22	3	2.8	2.6	1.3	0.6	2.0	1.6	I	
23	8	6.4	4.5	3.2	0.8	3.7	2.2	II	
24	15	22.0	12.0	10.7	2.0	10.0	6.6	I	
25	30	38.2	19.5	18.2	2.0	17.5	8.8	II	
26	55	60.0	30.3	29.0	5.0	25.3	12.5	I	

Note) H_b=H-1.3

相対生長については、清水⁸⁵⁾(1959)によって詳しい論述がなされている。それによれば相対生長は、1930年代にそれまで経験的に認められていた生物体の2つの部分xとyの間に成り立つ函数関係

$$y = \alpha x^h$$

ここで、 α は始原生長指数(initial growth index)、 h ば相対生長係数(relative growth coefficient)と呼ばれる定数

について、HUXLEY(1932)および TESSIER(1934)によって一般化されたものである。

上式は allometry 式と呼ばれており、時間の項の含まれていないことが重要な特徴となっている。すなわち、時間を尺度とする生長速度(dy/dt)は、種により、また同一種でも環境により著しく異なるもので、生物の生育段階を表わすのに天文学的時間(calendar age)は、それほど重要な意味をもたないというのがその理由である、それよりも生長系自体の状態を生物学的年齢(biological age)とみなし、その函数として部分の生長関係を表わす方が意味があるとしている⁸⁵⁾。最近、この allometry 式は森林の現存量の推定に広く利用されるに至っている。

林分の樹高は、上述したように立木密度による影響を受けることが少なく、しかも外部の無機的環境(地位)に鋭敏に反応する。したがって、樹高を林分または立木の生育段階すなわち生物学的年齢を示す好適な指標とみなすことができる。以上のような樹高の意義づけによって、林分または立木の他の生長部分を樹高の函数として表わせば、生育段階にともなうそれぞれの部分の生長法則を与えるものとみなすことができる。

以上の観点から表-2.1の疎開木の測定値を標本値として、以下で順次樹高对各生長部分の相対生長関係に検討を加える。

(2) 樹高対直径の相対生長関係

生物体の部分間に allometry 式が成り立つには、次の2つの条件が前提となる(清水⁸⁹ 1959)。i) 生長は本質的に自己増殖である。ii) 自己増殖速度の変化は、すべての部分に同じように影響する。立木について i) は自明である。ii) は2つの生長部分の大きさをそれぞれ x, y とすると、時間および地位に関する両部分の生長率 (specific growth rate) の比が一定、すなわち

$$\frac{\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial t}}{\frac{1}{x} \frac{\partial x}{\partial t}} = \frac{hy}{hx} = h \quad \dots\dots (2.1)$$

および

$$\frac{\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial SI}}{\frac{1}{x} \frac{\partial x}{\partial SI}} = \frac{hy}{hx} = h \quad \dots\dots (2.2)$$

ここで、t は年齢、SI は地位、hx, hy はそれぞれ x, y の生長率、h は相対生長係数の成立することを要求するものである。

立木の生長部分 x と y は、ともに年齢 t および地位 SI の媒介変数であり、(2.1)、(2.2) 式が満たされていれば、

表-2.2 樹幹解析によった疎開木の測定値
Table 2.2 The values measured by means of the stem analysis of an open-grown tree.
Tree No. 25

年 齢			胸 直 径	総 樹 高	胸 高	樹 冠 長	樹 冠 幅
t	Age in years	t'	D. b. h.	Total height	Height above breast height	Crown length	Crown width
	(年)	t'	(cm)	(m)	H _a	L _c	W _c
3	1	—	1.4	2.0	0.7	0.0	0.00
4	2	1	3.4	3.0	1.7	1.0	0.70
5	3	2	5.2	3.8	2.5	1.8	1.30
6	4	3	6.8	4.6	3.3	2.6	1.80
7	5	4	8.8	5.6	4.3	3.6	2.40
8	6	5	10.4	6.4	5.1	4.6	2.90
9	7	6	12.0	7.2	5.9	5.2	3.40
10	8	7	13.8	8.1	6.8	6.1	3.90
11	9	8	15.0	8.6	7.3	6.6	4.40
12	10	9	17.0	9.6	8.3	7.6	4.80
13	11	10	18.4	10.3	9.0	8.3	5.20
14	12	11	20.0	11.1	9.8	9.1	5.60
15	13	12	21.7	11.9	10.6	9.9	6.00
16	14	13	23.0	12.3	11.0	10.3	6.30
17	15	14	24.2	13.1	11.8	11.1	6.60
18	16	15	25.8	13.9	12.6	11.9	6.90
19	17	16	27.0	14.5	13.2	12.5	7.20
20	18	17	28.4	15.2	13.9	13.2	7.50
21	19	18	29.6	15.8	14.5	13.8	7.80
22	20	19	31.0	16.5	15.2	14.5	8.00
23	22	20	32.0	16.9	15.6	14.9	8.20
24	22	21	33.0	17.4	16.7	15.4	8.50
25	23	22	34.0	17.9	16.6	15.9	8.70
26	24	23	34.8	18.3	17.0	16.3	8.80
27	25	24	35.6	18.7	17.4	16.7	8.90
28	26	25	36.4	19.1	17.8	17.1	9.00
29	27	26	37.2	19.5	18.2	17.5	9.10

注) t' は胸高年齢, t'' は樹冠長年齢
Note) t' is breast height age and t'' is crown length age

Tree No. 26

年 齡 Age in years t t'			胸 高 D. b. h. Do	總 樹 高 Total height H	胸 高 Height above brest height H _a	樹 冠 長 Crown length Lo	樹 冠 幅 Crown width Wo
(年)			(cm)	(m)	(m)	(m)	(m)
3	1	—	1.4	2.1	0.8		
4	2	—	3.0	3.0	1.7		
5	3	—	5.0	4.0	2.7		
6	4	0	7.3	5.0	3.7	0.0	0.00
7	5	1	9.6	6.3	5.0	1.3	1.00
8	6	2	11.8	7.3	6.0	2.3	1.80
9	7	3	13.6	8.2	6.9	3.2	2.40
10	8	4	15.5	9.2	7.9	4.2	3.20
11	9	5	18.0	10.0	8.7	5.0	3.70
12	10	6	20.0	10.8	9.5	5.8	4.20
13	11	7	21.8	11.7	10.4	6.7	4.80
14	12	8	23.6	12.3	11.0	7.3	5.20
15	13	9	25.2	13.0	11.7	8.0	5.50
16	14	10	26.4	13.8	12.5	8.8	6.00
17	15	11	27.6	14.5	13.2	9.5	6.40
18	16	12	29.0	15.2	13.9	10.2	6.70
19	17	13	30.2	16.0	14.7	11.0	7.20
20	18	14	31.6	16.8	15.5	11.8	7.60
21	19	15	33.0	17.6	16.3	12.6	8.00
22	20	16	34.2	18.2	16.9	13.2	8.20
23	21	17	35.0	18.8	17.5	13.8	8.50
24	22	18	36.0	19.3	18.0	14.3	8.70
25	23	19	36.8	19.8	18.5	14.8	8.90
26	24	20	38.0	20.4	19.1	15.4	9.20
27	25	21	39.0	20.9	19.6	15.9	9.40
28	26	22	40.0	21.3	20.0	16.3	9.60
29	27	23	40.6	21.7	20.4	16.7	9.70
30	28	24	41.4	22.3	21.0	17.3	9.90
31	29	25	42.2	23.0	21.7	18.0	10.20
32	30	26	43.0	23.6	22.3	18.6	10.40
33	31	27	44.0	24.9	22.8	19.1	10.60
34	32	28	44.6	24.5	23.2	19.5	10.70
35	33	29	45.6	25.0	23.7	20.0	10.90
36	34	30	46.4	25.5	24.2	20.5	11.05
37	35	31	47.2	25.8	24.5	20.8	11.10
38	36	32	47.8	26.0	24.7	21.0	11.20
39	37	33	48.8	26.3	25.0	21.3	11.25
40	38	34	49.6	26.5	25.2	21.5	11.30
41	39	35	50.4	26.8	25.5	21.8	11.40
42	40	36	51.2	27.1	25.8	22.1	11.45
43	41	37	52.0	27.4	26.1	22.4	11.50
44	42	38	52.6	27.7	26.4	22.7	11.60
45	43	39	53.0	28.0	26.7	23.0	11.70
46	44	40	53.8	28.3	27.0	23.3	11.80
47	45	41	54.4	28.5	27.2	23.5	11.85
48	46	42	55.0	28.8	27.5	23.8	11.90
49	47	43	55.6	29.0	27.7	24.0	12.00
50	48	44	56.0	29.3	28.0	24.3	12.05
51	49	45	56.5	29.5	28.2	24.5	12.10
52	50	46	56.8	29.7	28.4	24.7	12.15
53	51	47	57.2	29.8	28.5	24.8	12.20
54	52	48	57.6	30.0	28.7	25.0	12.25
55	53	49	58.0	30.3	29.0	25.3	12.30

部分のいかんを問わず、 x と y の間に allometric 関係

$$\frac{x}{y} \frac{dy}{dx} = h \quad \dots\dots (2.3)$$

が成り立つ。

生長部分 x , y がともに exponential な生長にしたがうとき、(2.1) 式は無条件に成り立つ。般に植物の生長は、与えられた環境のもとで上限値(asymptote)をもつ。このような場合に (2.1) 式の関係が、無条件に x , y との間に成り立つとは限らない。この関係は、同一地位上の立木を選び時間に対する両部分の生長量を測定することによって確かめることができる。この条件に適合する資料は、立木を樹幹解析することによって求められる。そこで、表-2.1 の疎開木のうちから、もっとも生育段階の進んでいる No.25, No.26 の2本の立木を選んで樹幹解析を行った(表-2.2)。

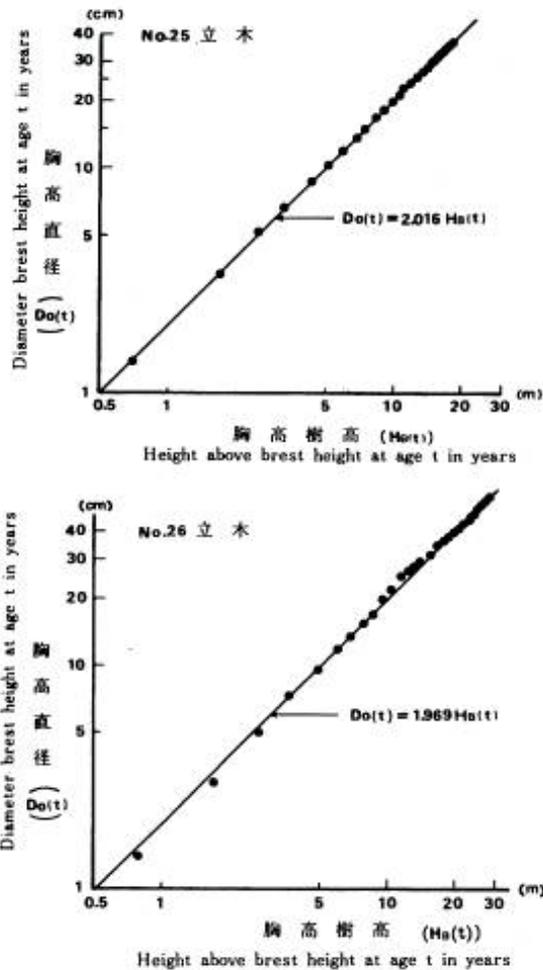


図-2.1 樹幹解析の測定値による樹高対直径の相対生長関係 (H_B = 総樹高 - 1.3)
 Fig. 2.1 Relationships between height and diameter measured by means of the stem analysis of an open-grown tree. The relations are interpretable as simple allometry between the amounts of two different parts of a tree, height and diameter.

上の樹幹解析によって測定された同一年齢の樹高対胸高直径(皮内)の値を、両対数グラフ上にプロットし図-2.1に示した。この図で認められるように、両疎開木ともその測定点は明らかに直線上にプロットされた。この結果から、樹高生長と直径生長との間に(2.1)式の成立することが帰納される。なお、この場合の樹高には胸高直径に対応させるために、胸高(1.3mの地上高)から幹の梢端までの樹高(総樹高 - 1.3m)を用いた。以下この樹高を便宜上単に胸高樹高と呼び、記号 H_B をもって示すことにした。次に、樹高と胸高直径の两部分についてそれぞれの生長経過(絶対生長)と(2.1)式の成立条件との関連について若干の検討を試みる。カラマツは初期ほど旺盛な生長を遂げる早生型の樹種で、直径樹高ともに凸な生長曲線をえがく(河田ら²⁵⁾1949, 嶺⁵¹⁾1955, 松井⁴⁸⁾1957, 西沢ら⁶⁵⁾1965, 柿原²⁴⁾1967, 小林³³⁾1974, 小林ら³²⁾1974)。両疎開木も同様な生長曲線を呈し、1階の定差図(図-2.2, 図-2.3)は樹高,直径ともに直線となる。この結果から両部分の生長はともに MITSCHERLICH 式にしたがうことが明らかである(権ら¹⁵⁾1973)。この場合、(2.1)式は

$$\frac{1}{D_0} \frac{\partial D_0}{\partial t'} = \lambda_D \left(\frac{D_0^*}{D_0} - 1 \right) \quad \dots\dots (2.4)$$

$$\frac{1}{H_B} \frac{\partial H_B}{\partial t'} = \lambda_H \left(\frac{H_B^*}{H_B} - 1 \right)$$

ここで D_0 は疎開木の胸高直径(cm), H_B は同じく胸高樹高(m), D_0^* および H_B^* はそれぞれの上限值, λ_D および λ_H はそれぞれの生長係数, t' は

胸高に達するまでに要した年齢を引いた年齢で以下単に胸高年齢と呼ぶ（年）となる。(2.4) 式から微分方程式

$$\frac{dD_o}{dH_B} = \lambda \left(\frac{D_o^* - D_o}{H_B^* - H_B} \right) \quad \dots\dots (2.5)$$

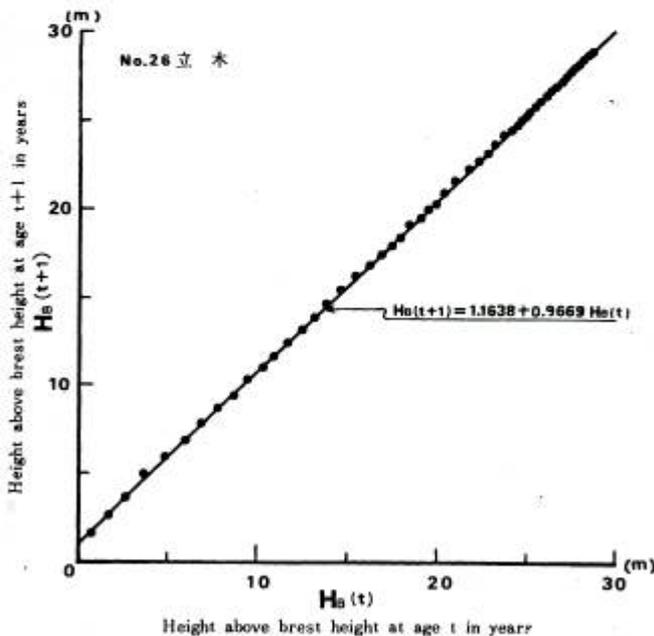
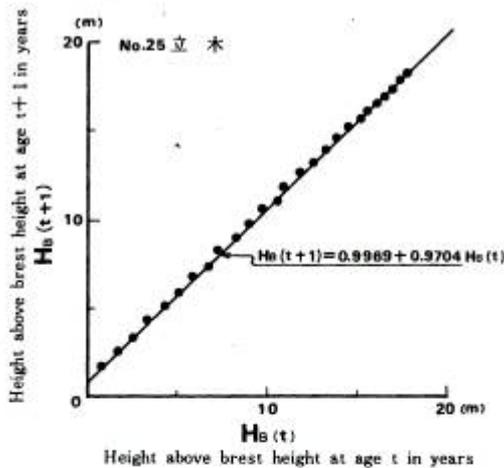


図-2.2 疎開木の樹高の定差図
Fig.2.2 Difference of the height measured by means of the stem analysis of an open-grown tree.

ここで、 $\lambda = \lambda_D / \lambda_H$ が導かれる。(2.5) 式を解いて

$$D_o = D_o^* - \alpha (H_B^* - H_B)^2$$

がえられる。初期条件

$$H_B)_{t=0} = 0, D_o)_{t=0} = 0$$

から積分定数は

$$\alpha = D_o^* / H_B^{*2}$$

よって解は

$$D_o = D_o^* - \frac{D_o^*}{H_B^{*2}} (H_B^* - H_B)^2$$

..... (2.6)

となる。

(2.6) 式は、樹高生長、直径生長ともに MITSCHERLICH 式にしたがう場合の樹高対直径の相対生長関係を与えるものである。この場合、明らかに两部分の間に無条件に allometry 式は成り立たず、 $\lambda = 1$ 、すなわち、 $\lambda_D = \lambda_H$ のときのみ

$$D_o = \frac{D_o^*}{H_B^*} \cdot H_B \quad \dots\dots (2.7)$$

となる。この (2.7) 式は、相対生長係数 $h = 1$ の特殊な allometry 式 (isometry) である。

2本の樹幹解析木の樹高および直径生長曲線に MITSCHERLICH 式

$$\left. \begin{aligned} H_B &= H_B^* \left\{ e^{-\lambda_H(t-\tau)} \right\} \\ D_o &= D_o^* \left\{ e^{-\lambda_D(t-\tau)} \right\} \end{aligned} \right\}$$

..... (2.8)

を、最小自乗法^{注)}によって当てはめた結果、それぞれ表-2.3に掲げた

注) 本報告における最小自乗法は、x、y軸の誤差を考慮して、重みづけする方法 (Deming¹¹⁾ 1968) による。

表-2.3 疎開木の直径と樹高の生長曲線のパラメーター
 Table 2.3 Parameters of the diameter and height growth curve
 (MITSCHERLICH equation) for two open-grown trees.

立木番号 Tree No.	胸高直径 D. b. h.			胸高樹高 Height above breast height			λ_D/λ_H	$D_0/H_0 = a$
	λ_D	D_0	τ	λ_H	H_0	τ		
25	0.0306	67.89	2.5	0.0300	33.68	2.5	1.020	2.016
26	0.0340	69.22	2.4	0.0336	35.16	2.6	1.012	1.969

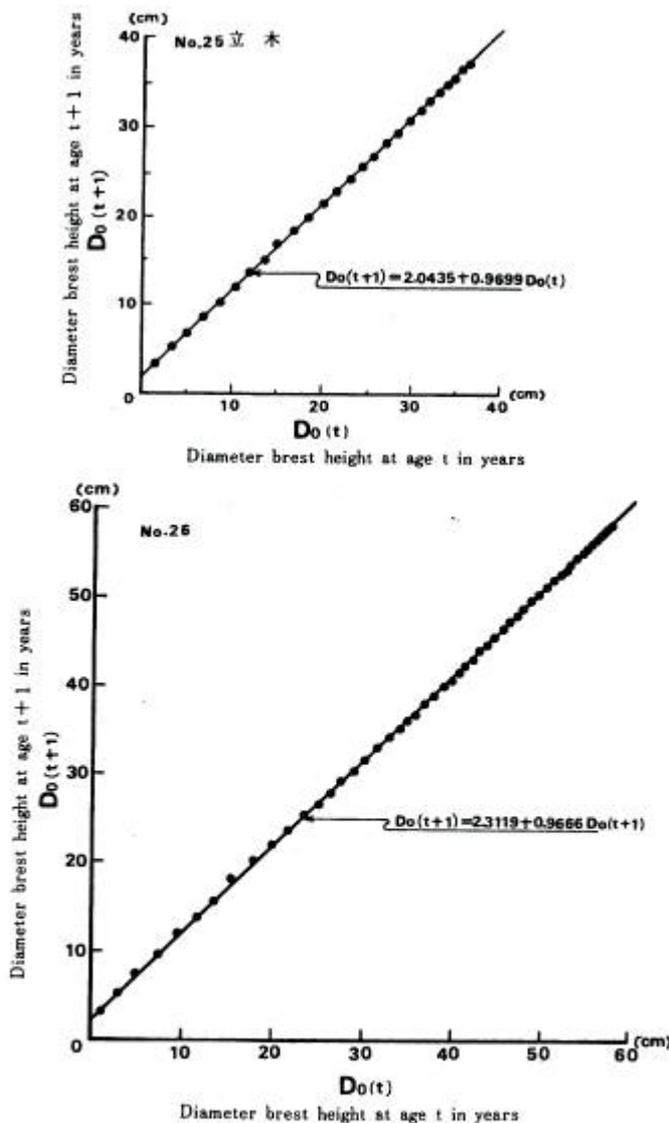


図-2.3 疎開木の胸高直径の定差図
 Fig. 2.3 Difference of the diameter measured by means of the stem analysis of an open-grown tree.

パラメーターの推定値がえられた。

No.25, No.26 の両疎開木とも胸高樹高と胸高直径の生長係数がほぼ等しく、両者の間に (2.7) 式の関係の成立することが明らかである。この結果から、両部分の関係は allometry 式

$$\left. \begin{aligned} \text{No.25...} D_0(t') &= 2.016 H_B(t') \\ \text{No.26...} D_0(t') &= 1.969 H_B(t') \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.9)$$

ここで、 $D_0(t')$ は胸高年齢 t' ($= t - \tau$) における皮内の胸高直径、 $H_B(t')$ は同じく胸高樹高によって表わされる。以上の結果から、カラマツの疎開木について、樹高と直径の生長係数が等しく、両部分の間には年齢を問わず常に比例関係が保たれているといえることができる。

次に、(2.2) 式の成立の可否についてみよう。この場合には、地位を異にする (年齢対樹高の関係の異なる) 疎開木の樹高直径の関係を調べ、樹幹解析木で認められた時間を因子とした場合の係数と比較することによって帰納できる。表-2.1 の疎開木の年齢対樹高の関係を示すと図-2.4 のとおりである。この図から明らかなように、調査された疎開木には、若干の範囲ではあるが地位

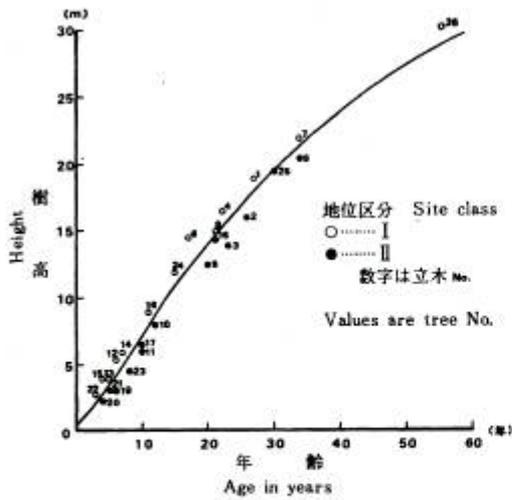


図-2.4 疎開木の樹高地位の区分
Fig.2.4 Classification of site for each open-grown tree.

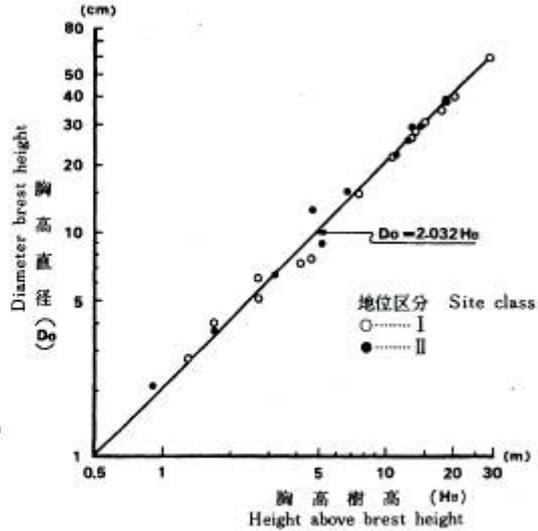


図-2.5 疎開木 (標本木) の樹高対直径の相対生長関係
Fig.2.5 Simple allometry between height and diameter measured by means of the sampling survey for open-grown trees.

の差が認められる。そこで、これらの疎開木の樹高対直径の測定値を図-2・5にプロットして示した。

図-2.5から明らかなように、樹幹解析木の場合と同様に、測定点は直線上に並び、また地位による一定傾向の分離も認められない。この測点列に対して、直線式を最小自乗法によって当てはめた結果、(2・9)式とほぼ一致する

$$D_o = 2.032H_B \quad \dots\dots (2.10)$$

がえられた。

以上の検討を通じて、疎開環境で生育するカラマツ立木の幹について、胸高樹高と胸高直径との間に地位、時間の両因子に対して、ともにそれぞれの生長率の比を1とする

$$\frac{dD_o}{D_o} = \frac{dD_B}{H_B} \quad \dots\dots (2.11)$$

の関係の成立することを認めることができた。(2.11)式の積分型は、相対生長係数を1とする allometry 式であり、

その始原生長指数は、年齢、地位を異にする 26本の疎開木の測定値から求められた(2.10)式の値 2.032をとることができる。

(3) 樹高対樹冠の相対生長関係
隣接木と接することなく、十分に陽光を受けて生育してきた疎開木の樹冠部は、立木の生育段階に応じて、種に固有な法則にしたがって発達してきていることが予想される。MITCHELL⁵²⁾(1969)は、

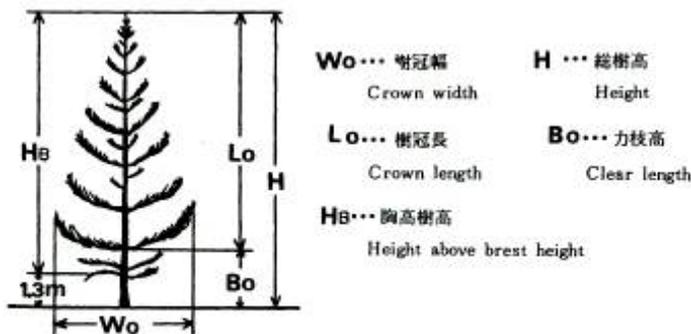


図-2.6 樹冠因子の測定部位
Fig.2.6 Definition of crown size.

White spruce の疎開木について枝長と、その枝の基部から上の樹高との関係が相対生長係数 0.75 の allometry 式で表わされることを示している。ここでもカラマツ疎開木について同様な関係に分析を加える。

図-2.6 に示したように、樹冠の最大幅を樹冠部の水平方向の生長部分と考えて樹冠幅(W_0)と呼ぶことにした。また、樹冠部の垂直方向への生長部分として、力枝の基部より梢端までの長さを取りこれを樹冠長(L_0)とした。No.25, No.26 の両疎開木の力枝(樹冠幅を構成している主枝)を 10cm 間隔に切断し各断面の年輪を数えて枝の年齢 t ” (幹の中心を 0 年とする)ごとの枝長を測定した。さらに、これらの測定値を若枝角度によって補正して水平長を算出した。これらの値を 2 倍して各年齢における樹冠幅とした。また、各年齢の樹冠長を、樹幹解析によって測定した総樹高から力枝高を差し引いて求めた。

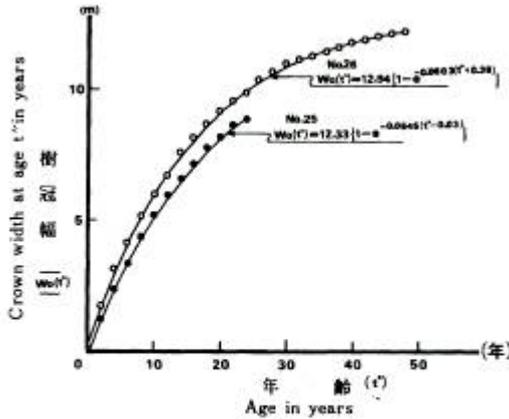


図-2.7 疎開木(樹幹解析木)の樹冠幅の生長曲線
Fig.2.7 Growth curve of crown width measured by means of the stem analysis of an open-grown tree.

以上の手順によってえられた疎開木の樹冠幅を年齢に対してプロットし図-2.7 に示した。樹冠幅も樹高および胸高直径と同様に、1 階の定差図は直線となる。よって MITSCHERUCH 式を当てはめ、それぞれ

$$\begin{aligned} \text{No.25} \cdots W_0(t'') &= 12.33 \left\{ 1 - e^{-0.0545(t''-0.03)} \right\} \\ \text{No.26} \cdots W_0(t'') &= 12.94 \left\{ 1 - e^{-0.0603(t''+0.38)} \right\} \end{aligned} \quad \cdots \cdots (2.12)$$

ここで、 $W_0(t'')$ は年 t'' における疎開木の樹冠幅(m) がえられた。

一方、樹冠の上長方向の生長部分である樹冠長の生長曲線は、樹高の生長曲線式(2.8)式から、それぞれ次式が求められる。

$$\begin{aligned} \text{No.25} \cdots L_0(t'') &= H_B(t''+3) - H_B(3.03) \\ &= 33.16 \left\{ 1 - e^{-0.0300(t''-0.03)} \right\} \\ \text{同様に} \\ \text{No.26} \cdots L_0(t'') &= 31.77 \left\{ 1 - e^{-0.0336(t''+0.38)} \right\} \end{aligned} \quad \cdots \cdots (2.13)$$

ここで、 $L_0(t'')$ は t'' における疎開木の樹冠長(m)

(2.12),(2.13)式から明らかなように疎開木の樹冠の生長係数は、水平方向と垂直方向で異なり、その比はそれぞれ

$$\begin{aligned} \text{No.25} \cdots \lambda &= \lambda_w / \lambda_L = 1.8167 \\ \text{No.26} \cdots \lambda &= \lambda_w / \lambda_L = 1.7946 \end{aligned} \quad \cdots \cdots (2.14)$$

ここで、 λ_w は樹冠幅の生長係数、 λ_L は同様に樹冠長の生長係数で、ほぼ 1.8 前後の値となっている。この場合の两部分間の生長卒の比は

$$\frac{\frac{1}{W_0} \frac{\partial W_0}{\partial t}}{\frac{1}{L_0} \frac{\partial L_0}{\partial t}} = \lambda \frac{\frac{W_0^*}{W_0} - 1}{\frac{L_0^*}{L_0} - 1} = \lambda \frac{e^{\lambda_L t''} - 1}{e^{\lambda_w t''} - 1} \quad \cdots \cdots (2.15)$$

となり 1 時間に対してはほぼ指数曲線的に減少していく。したがって、樹冠長と樹冠幅の間に allometry 式は成り立たず、(2.6)式の場合となる。すなわち

$$W_0 = W_0^* - \alpha(L_0^* - L_0)^2 \quad \cdots \cdots (2.16)$$

となる。両疎開木については、それぞれ

$$\begin{aligned} \text{No.25} \dots W_0(t^n) &= 12.33 - 0.0213 \{33.16 - L_0(t^n)\}^{1.8167} \\ \text{No.26} \dots W_0(t^n) &= 12.94 - 0.0261 \{31.77 - L_0(t^n)\}^{1.7946} \end{aligned} \quad \dots (2.17)$$

の関係式となる (図-2.8)。

(2.17)式で、両疎開木のパラメーター λ および α がそれぞれ近い値を示すことから、地位に対しても(2.15)式と同様な関係にあり、この結果、樹冠長と樹冠幅との相対生長関係として

$$\frac{dW_0}{dL_0} = \lambda \frac{W_0^* - W_0}{L_0^* - L_0} \quad \dots (2.18)$$

の成立が推測される場所である。この関係が成り立っていれば、(2.16)式から

$$W_0^* = \alpha L_0^{*\lambda} \quad \dots (2.19)$$

となり、樹冠幅の上限値は、樹冠長の上限値の函数となる。このことは、樹冠幅が樹冠長によって一意的に定まらず、両者の相対生長関係は、樹冠長の上限値すなわち樹高の上限値、いかえれば地位によって異なることを示すものである。

No.25, No.26 の疎開木も含め

て 26 本の疎開木の樹冠長対樹冠幅の測定値(表-2.1)を両対数グラフ上にプロットし図-2.9に示した。測定値の点列は、ほとんど直線上に並び、また、地位による違いも認められず一見 allometry 式が適合しているように思われる。この原因として、地位にかかわらず樹冠長の上限値が一定をとる一樹高の上限値が一定値となる一か、または生長の上限に近い標本木が少ないためなどが考えられる。いずれにしても、

(2.16)式で与えられる両生長部分の関係を確かめるには、地位の広い範囲に及ぶ高齢な疎開木の解析を行う必要がある。ここではそのような資料をとることができなかったので、図-2.9の直観にしたがって、樹冠長対樹冠幅の関係が anometry 式で表わされるものとした。すなわち、この場合の allometry 式は、両者の関係を理論的に表わすものではなく、近似的に成立するという仮定したものである。

図-2.9の測定値に対して最小自乗法によって allo

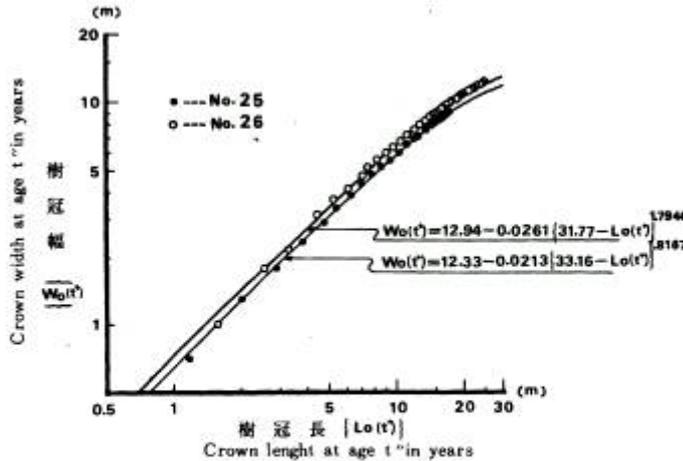


図-2.8 疎開木の幹および力枝の解析によって測定した樹冠長対樹冠幅の相対生長関係
Fig. 2.8 Relationships between crown length and crown width measured by means of the stem, branch analysis of an open-grown tree.

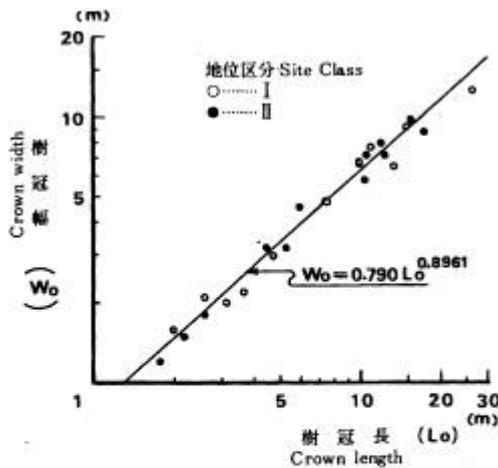


図-2.9 疎開木(標本木)の樹冠長対樹冠幅の相対生長関係
Fig. 2.9 Relationships between crown length and crown width measured by means of the sampling survey for open-grown trees. The relations are approximately interpretable as simple allometry between two parts, crown length and crown width.

metry 式を当てはめ

$$W_0 = 0.790L_0^{0.8961} \quad \dots\dots (2.20)$$

がえられた。(2.20) カラマツ疎開木の樹冠幅対冠長に対して劣生長(negative growth)の関係にあることを示している。

次に総樹高と樹冠長の関係について検討を加える。疎開木は十分な太陽光を受けているが、樹冠の発達とともに自己被陰のために、生育段階の進むにしたがって下層の枝が次第に枯れ上がる。図-2.10は疎開木26本の総樹高と力枝高の関係を示したものである。かなりの変動をとまなうが、ほぼ直線関係が認められ、これに対して直纏式を当てはめ次の両者の関係式をえた

$$B_0 = 0.215H \quad \dots\dots (2.21)$$

ここで、 B_0 疎開木の力枝高、 H は同じく総樹高

樹冠長は $L_0 = H - B_0$ であるから (2.21)式により

$$L_0 = 0.785H \quad \dots\dots (2.22)$$

の関係式が求められる。この結果から、カラマツ疎開木は、常に樹高の約80%に当る樹冠長を保持して生育しているということがいえる。

(2.20)と(2.22)の両式の関係から総樹高に対する樹冠幅の allometric 関係

$$W_0 = 0.636H^{0.8961} \quad \dots\dots (2.23)$$

が導ける。もちろん、(2.20)式が近似式であるから、上の関係も近似的なものである。

(4) 考 察

単木の生長を基礎とする林分生長モデルの構成に際して、密度効果の下限の基準値として疎開木がしばしば利用されていることは、§1-3で指摘したところである。KRAJICEKら⁴⁾(1961)の研究に代表されるように、多くの場合に疎開木の胸高直径と樹冠幅の間の直線関係が利用されてきた。しかし、このような関係は測定値の傾向から直観的に定められたもので、理論的な根拠に乏しく一般的法則として受け入れにくいものである。本研究ではより一般化のできる法則性を求めるため、疎開木を種固有な内因的生長法則にしたがった個体とみて、当然各生長部分間に一定の相対生長関係を有するという仮定に立って検討を加えてきた。

取り上げた生長部分はいずれも樹形を定める平面要素である。そのうちの樹高を、その特性から生物学的年齢の指標とみなし、他の部分を樹高の函数とする相対生長関係について検討した。また、立木および林分の生長部分間の関係を対数オーダーの直角座標にプロットすると、その変動幅が縮小されて多くの場合直線的に配列し、両者の本質的な関係を見逃しやうい。こうした誤ちを避けるため、時間と地位の2つの要因から allometric 関係の成立条件の検討を行った。さらに、それぞれの部分の生長法則、すなわち絶対生長(absolute growth)と両部分の相対生長の関連についても分析を試みた。

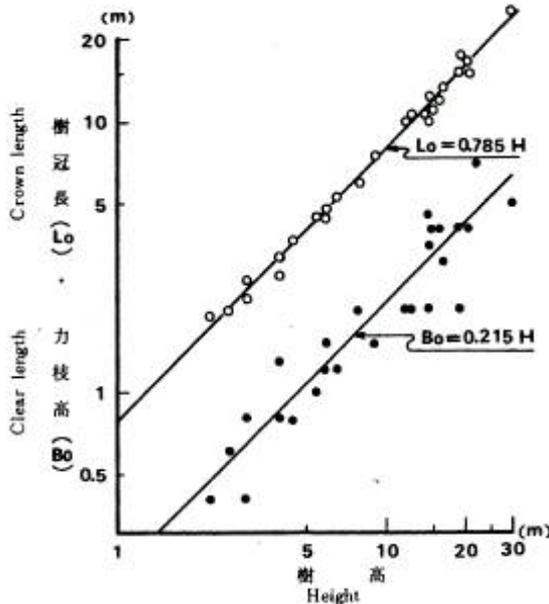


図-2.10 疎開木の樹高対力枝高および樹冠長の相対生長関係
Fig.2.10 Simple allometry between height and crown length, clear length measured by means of the sampling survey for open-grown trees.

以上のような検討を通じて、カラマツ疎開木の胸高直径と、その位置に対応する胸高樹高の間には、単純な比例関係の成立が確かめられた。この結果は、隣接木と競争のない状態で生長してきた立木の直径対樹高の比は一定でその幹形は円錐形を保つという BRAATHE⁹⁾(1957)の指摘と一致するものである。BRAATH⁹⁾はその原因として、十分な生育空間のもとでは生抜が幹の下部まで着生するためであるとしている。また四手井ら⁸⁾(1960)はカラマツの1個体について、ある高さでの幹の材積生長量は、その高さより上の部分に着生している積算葉量に比例することを示している。疎開木は、力枝の位置が低く、樹冠部が胸高を含むか、あるいはその近くに位置するため、直径とその位置より上の樹高との間に比例関係が成立しているものと考えられる。樹高生長が進むにつれて、樹冠部は次第に胸高より上方へ離れていく。したがって、この比例関係は成り立たなくなることが予想されたが、今回測定した樹高30mの範囲内では、この傾向は認められなかった。なお、疎開木の選定基準に適合しない瓜衝地帯の立木については、当然ここで求めた部分間の相対生長関係を適用することはできないが、疎開木との変位量から逆に2次の生長阻害因子の作用を測りだすことができよう。

樹冠形を定めている平面要素である樹冠長と樹冠幅との相対生長関係を求めたが、その結果、樹冠幅の発達は樹冠長の生長に比較して劣り、いわゆる negative growth の allometric 関係が近似的であるが成り立つことを確認できた。また、この関係を導く場合の標本木の構成から、各単木について力枝高より上部の樹冠部の任意の位置について回し相対生長関係が成り立っていることは明らかである。この結果、カラマツ疎開木の樹冠幅は、立木の生育段階が進むにつれて、次第にその下部ほど生長が劣って半紡錘形を呈するようになる。また、同時に、樹冠の自己被陰によって樹冠下部の枝が枯れ、樹冠部は次第に樹高の上部へ移行するが、樹高に占める樹冠長部の比率はほぼ一定(約80%)に保たれる。以上のような各部分間に認められる関係は、カラマツ疎開木か年齢、地位にかかわらず、それぞれの樹高に応じたほぼ一定の樹形を呈することを示すものである。

また、しばしば利用される疎開木の胸高直径と樹冠幅との関係は、樹高対直径の(2.10)式と樹高対樹冠幅の(2.23)式から、

$$W_0 = 0.536(0.492D_0 + 1.3)^{0.8961} \quad \dots\dots (2.24)$$

の関係式で示される。この式から明らかなように、両者の間に直線関係が成り立つには、樹冠幅と樹高が比例関係になければならない。このことは針葉樹の樹形からは考えられない現象であり、両者の関係を直線で表わすことは、きわめて粗い近似といわねばならない。

本節では、最大有効空間における立木の上長生長と肥大生長との関係を、生長部分間の相対生長という面から分析を加えてきた。§1-3で概念的に提示した最大有効空間を常に保って生長する立木の生長法則を把握したことになり、これらの法則性は、以後の林分生長モデル構成の根拠として重要な意義をもつものである。

§2-3 無間伐林分の樹高対直径の相対生長モデル

(1) 無間伐林分の閉鎖モデル

一般に幼齢期の一斉人工林では、各立木とも樹冠が発達していないため十分な生育空間を与えられており、前節で述べた疎開林分に近い状態にある。このような林分が立木本数を一定に保ったままさらに生長すれば、立木の樹冠が発達して林分はやがて閉鎖する。閉鎖した林分に入射する太陽光は、林冠を形成している葉層に順次吸収されて、幾何級数的に減衰することが明らかになっている(依田¹⁰⁾1971)。そのため立木の樹冠下部の枝葉は、陽光不足となり枯れ上がる。安藤³⁾(1968)はスギ、アカマツおよびカラマツの各樹種の林分について、枝下率が林分の収量比数の増加にともなって上昇するという資料を示している。それによると、3樹種のうちでカラマツ林分の枯れ上がり度合いがもっとも大きく、カラマツの陽樹的特性がうかがわれる。

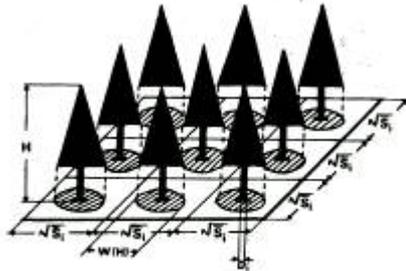


図-2.11 仮想林分の立木配置
Fig. 2.11 Arrangement of the trees in the hypothetical stand, where all the trees are homologous in dimension and spacing.

林分の閉鎖の進行にともなう林分収穫量の変化の法則性は、生態学の立場から林分の競争密度効果としてとらえられている(吉良 29)1957)。この過程を単木単位にみれば、生育空間の制限による立木の着棄量の減少と、それにとともなう幹部の肥大生長量の低下現象とみなすことができる。ここでは、このような観点から林分の閉鎖過程のモデル化を試みた。

まず、図-2.11 に掲げたような樹高 H 、胸高直径 D とも全く同じ大きさの立木が方形に配列している単純な仮想林分を想定する。この林分の ha 当りの初期本数密度を i で表わし、この林分が生長してある樹高に達したとき閉鎖する一直径生長に閉鎖効果が作用する一ものとする。以下、このときの樹高を H_{oi} で表わしこれを疎開樹高と呼ぶ。閉鎖後も立木本数が一定に保たれているものとする、単木当りの林地面積も変ることなく

$$\bar{S}_i = 10,000/i, \quad (m^2) \quad \dots\dots (2.25)$$

で推移する。上の \bar{S}_i は立木の占有面積であり仮想林分では、すべての立木が等しい占有面積を占めている。

仮想林分の閉鎖開始時 ($H = H_{oi}$) における立木の樹冠幅を W_{oi} とすると、占有面積との間に

$$W_{oi} = C_{Hi} \cdot \bar{S}_i^{0.5} \quad \dots\dots (2.26)$$

の関係が成り立つ。(2.26)式で C_{Hi} は樹冠のうっ閉状態を示す係数で、ここではこれをうっ閉比と呼ぶことにする。一般に閉鎖の開始時には $C_{Hi} < 1$ の値をとり、閉鎖の進行にともなって 1 に近づくものと考えることができる。壮齢期以後のカラマツ人工林では、かなり密な林分でも樹冠の交差はほとんどみられず、ほぼ $C_{Hi} \doteq 1$ の状態が観察される。

仮想林分が上のような前提のもとで生長するものとする、立木の閉鎖の進行過程は、図-2.12 に示したような経過をたどる。すなわち、本数密度の高い林分ほど早い生育段階で閉鎖を始め、 $C_{Hi} \doteq 1$ のうっ閉状態に達し、以後はほぼ一定の樹冠幅で推移していく。一方、仮に立木が自由にその位置を移動できるものとして、その生長に応じて常に十分な生育空間(最大有効空間)を自動的に確保するものとするれば、そのときの樹冠幅は、図-2.12 上に示したように疎開木と同等な $W_o(H)$ となる。 $W_o(H)$ は、いわばその樹種の生育段階 H における固有な潜在樹冠幅と考えることができる。一方、閉鎖林分における立木の樹冠幅 $W_{ci}(H)$ は、閉鎖によって

$$\Delta W_{ci}(H) = W_o(H) - W_{ci}(H) \quad \dots\dots (2.27)$$

だけその潜在樹冠幅が減少させられたものとみなすことができる。減少幅 $\Delta W_{ci}(H)$ は、林分の生育段階が進むにしたがって大きくなり、閉鎖の進行度合いに比例する。さらに生育段階が進み、樹冠幅の減少幅がある値 ΔW_{ci}^* に

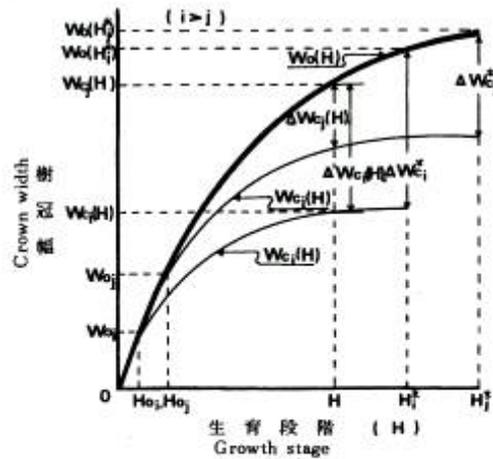


図-2.12 仮想林分の閉鎖過程
Fig. 2.12 An illustration of closing process of the hypothetical stand, where individual trees have begun to exert influence on the neighboring trees at growth stage H_{oi} , and will stop growing or die at H_i^* . Where both suffixes i and j shows number of trees per hectare.

達すると立木の生長は停止すると考えることができる。そのときの樹高を H_i^* で表わし、閉鎖限界樹高と呼ぶことにする。仮想林分が以上のような閉鎖過程をたどるとすると、立木の受ける閉鎖の度合いを

$$P_i(H) = \frac{W_o(H) - W_{ci}(H)}{W_o(H_i^*) - W_{ci}^*} \quad (H_{oi} \leq H \leq H_i^*) \quad \dots\dots (2.28)$$

ここで、 $W_o(H)$ は樹高 H の疎開木の樹冠幅、 $W_o(H_i^*)$ は樹高 H_i^* の疎開木の樹冠幅、 $W_{ci}(H)$ は樹高 H の閉鎖木の樹冠幅、 W_{ci}^* は閉鎖限界樹高 H_i^* に達した閉鎖木の樹冠幅(= $W_{ci}(H_i^*)$)で与えることができる。すなわち、 $P_i(H)$ は閉鎖に起因する樹冠幅の相対的な減少分を表わし、閉鎖開始時には0、閉鎖限界時には1となる。ここで、(2.28)式で定義される $P_i(H)$ を占有面積 \bar{S}_i を有する樹高 H の立木の閉鎖度と呼ぶことにする。

ここで立木の直径生長が、そのときの閉鎖度によって低下させられるものと考えたと

$$\frac{dD_i}{D_i} = \frac{dD_o}{D_o} \{1 - P_i(H)\}, \quad (1.3 < H_{oi} \leq H \leq H_i^*) \quad \dots\dots (2.29)$$

ここで D_i は占有面積 \bar{S}_i をもつ樹高 H の閉鎖木の胸高直径、 D_o は閉鎖木と等しい樹高 H をもつ疎開木の胸高直径、 $P_i(H)$ は閉鎖木の閉鎖度、 $1 - P_i(H)$ の項はこの閉鎖木の疎開度と呼ぶとおかれる。すなわち、閉鎖木の直径の増加率は、その立木と同等の生育段階にある疎開木の直径増加率に比例して、同時にその閉鎖木の疎開度 $1 - P_i(H)$ に比例するとするものである。

また、立木の樹高生長は本数密度、したがって占有面積によって影響されないという定説にしたがえば、(2.11)式と(2.29)式から、閉鎖木の樹高と直径の増加率の関係を示す

$$\frac{dD_i}{D_i} = \frac{dH_B}{H_B} \{1 - P_i(H)\}, \quad (1.3 < H_{oi} \leq H \leq H_i^*) \quad \dots\dots (2.30)$$

がえられる。すなわち、疎開木の樹高対直径の相対生長関係が閉鎖木に対して拡張されたことになる。この式を解いて、(2.10)式の関係を用いると

$$D_i = 2.032 H_{B \exp} \left\{ - \int \frac{P_i(H)}{H_B} dH_B \right\}, \quad (1.3 < H_{oi} \leq H \leq H_i^*) \quad \dots\dots (2.31)$$

がえられる。(2.31)式は一定の占有面積 \bar{S}_i を有する立木の樹高生長にともなう胸高直径の推移を表わすモデルである。ここでは、このモデルを誘導した理論的根拠にしたがって、樹高対直径の相対生長モデルと呼ぶことにした。(2.31)式のモデルは、直径への閉鎖効果が生育段階の進むにつれて exponential な影響を及ぼすことを示している。仮想林分の閉鎖の進行過程と直径生長への閉鎖効果を概念的に示してきたが、さらに、(2.31)式の具体的な数値計算を進める。そのためには、(2.28)式の閉鎖木の樹冠幅 $W_{ci}(H)$ および閉鎖限界樹高 W_{ci}^* を定めなければならない。そこで、まず仮想林分の閉鎖過程におけるうっ閉比 C_{Hi} を次のように定めておく。

$$\left. \begin{array}{l} \text{閉鎖開始時}(H = H_{oi}) \dots \dots \dots C_{Hi} = C_{Hoi} < 1 \\ \text{閉鎖後}(H_{oi} < H < H_i^*) \dots \dots \dots C_{Hoi} < C_{Hi} < C_{Hi}^* \\ \text{閉鎖限界時}(H = H_i^*) \dots \dots \dots C_{Hi} = C_{Hi}^* = 1 \end{array} \right\} \quad \dots\dots (2.32)$$

また、閉鎖木の樹冠幅について、閉鎖開始時から閉鎖限界時に至るまでの拡張過程が明らかではないので、ここでは直線的に拡張すると仮定する。すなわち、うっ閉比が

$$C_{H_i} = \frac{1 - C_{H_{oi}}}{H_i^* - H_{oi}} = (H - H_{oi}) + C_{H_{oi}}, \quad (H_{oi} \leq H \leq H_i^*) \quad \dots\dots (2.33)$$

で与えられるものとする。これから各閉鎖段階における樹冠幅は、次のように求められる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{閉鎖開始時}(H = H_{oi}) \dots \\ \text{閉鎖後}(H_{oi} < H < H_i^*) \dots \\ \text{閉鎖限界時}(H = H_i^*) \dots \end{array} \right\} \begin{array}{l} W_{oi} = C_{H_{oi}} \bar{S}_i^{0.5} = C_{H_{oi}} W_{ci}^* \\ W_{ci}(H) = C_{H_i} \bar{S}_i^{0.5} = C_{H_i} W_{ci}^* \\ W_{ci}^* = \bar{S}_i^{0.5} = W_{ci}(H_i^*) \end{array} \quad \dots\dots (2.34)$$

ここで閉鎖開始時のうっ閉比と疎開樹高がわかれば、閉鎖木の樹冠幅は(2.33)、(2.34)式によって求められる。四手井²⁸⁾(1956)は、一斉林について競争開始時の平均樹高と本数密度との関係を表わす h-n 線を示している。このときの樹高は、ここで疎開樹高と概念的には同じものと思われる。また、これとは別に吉良²⁹⁾(1957)は、密度効果の及ぶ下限状態の立木密度は、樹高とはほぼ同じ幹距の保たれているときであるとの見解を述べている。四手井の提示しているカラマツ人工林の h-n 線によって、植栽密度が、2,500 本/ha の場合に、競争開始時の樹高を求めてみると、6.46m となる。この樹高に相当する疎開木の樹冠幅は、(2.23)式から 3.38m と算出される。方形植栽だとすると、この場合の幹距は 2m であるから、この林分はすでに隣接木間の樹冠が完全に交差していることになる。実際に筆者の観察でも、このような現実林分では、樹冠の枯れ上がりがかかり生じている。一方、吉良の説にしたがえばこの林分では 2m の樹高に達した段階で密度効果が作用することになり、両者の間にかかなりの差が認められることになる。この差は密度効果に対する意義づけの相違などにも由来するものと思われるが、筆者の観察経験に基づいて、ここでは後者の説にしたがうことにした。

閉鎖開始時のうっ閉比は、(2.23)式から

$$C_{H_{oi}} = \frac{W_{oi}}{\bar{S}_i^{0.5}} = \frac{0.636 H_{oi}^{0.8961}}{\bar{S}_i^{0.5}} \quad \dots\dots (2.35)$$

ここで吉良説($H_{oi} = \bar{S}_i^{0.5}$)を採用すると

$$C_{H_{oi}} = \frac{0.636 (\bar{S}_i^{0.5})^{0.8961}}{\bar{S}_i^{0.5}} = 0.636 \bar{S}_i^{-0.052}$$

となり、閉鎖開始時のうっ閉比が占有面積の函数となる。本来うっ閉比は、同じ閉鎖度のもとでは一定値をとるべき性質のものである。よって、この条件に適合するように吉良説に修正を施し、閉鎖開始時の幹距を

$$\bar{S}_i^{0.5} = H_{oi}^{0.8961} \quad \dots\dots (2.36)$$

として、これを採用する。この結果(2.35)式から

$$C_{H_{oi}} = 0.636$$

となり、閉鎖開始時のうっ閉比が占有面積にかかわらず一定値となる。すなわち定数となるので、新たにこれを記号 C_0 で表わし

$$C_0 = 0.636 \quad \dots\dots (2.37)$$

とおくことにした。また、疎開樹高は上の(2.36)式から、占有面積の函数として

$$H_{oi} = \bar{S}_i^{0.558} \quad \dots\dots (2.38)$$

によって求められる。

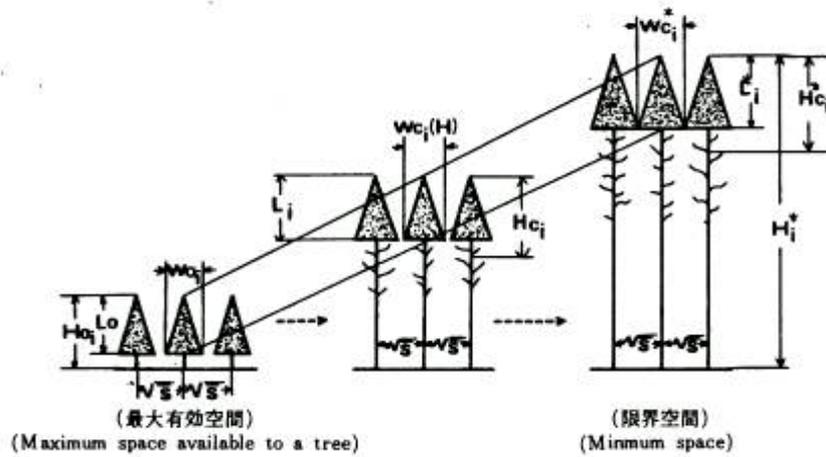


図-2.13 仮想林分の樹冠層の発達過程
Fig.2.13 An illustration of the canopy development in the hypothetical stand.

一方、閉鎖林分では林分の生育段階に応じて、一定面積に成立できる立木本数には限界のあることが、競争密度効果の研究から明らかにされており、四手井 84) (1963)は、その限界状態に達した林分を最多密度林分と呼んでいる。仮想林分では閉鎖度が 1 に達したとき、立木の生長は停止(枯死)し、上の最多密度林分に相当する状態に至る。このときの樹高が前に定義した閉鎖限界樹高 H_i^* である。

植物体の生長量は、その物質経済の面から、同化器官の量 C と非同化器官の量 F の比 F/C で定まることが明らかにされている(宝月 1958)。このような物質経済の面からみると、立木の樹冠長は C と、また樹高は F に対応する量である。したがって、樹高に対する樹冠長の比、すなわち樹冠長比

$$R=L/H \quad \dots\dots (2.39)$$

ここで、 R は樹冠長比、 L は樹冠長、 H は総樹高

は、 F/C 比と同様な意味をもつ指標とみなすことができる。閉鎖林分では、閉鎖の進行によって立木の樹冠長比が低下してゆき、やがてその物質収支の平衡する樹冠長比 R^* に達してその立木の生長は停止し、枯死するものと考えることができる。

図-2.13 に示したように、仮想林分は疎開木の樹冠長と等しい厚さの樹冠層で閉鎖を開始する。その後、下層の枝葉が下から順に枯れ上がることによって、樹冠層は相対的に樹高の上部へ移ってゆく。このような閉鎖過程においても、閉鎖林分の樹冠層部の受光環境は、疎開林分とはあまり変わらず、閉鎖林分の立木の樹冠部は、疎開木と同様な生長法則にしたがうものとみてよいであろう。すなわち、閉鎖木の樹冠部について疎開木と同等な樹冠長対樹冠幅の相対生長関係が成り立っているものと考えられる。なお付け加えれば、閉鎖木の樹冠は疎開木の樹冠下部の欠けたものということである。

以上の根拠によって、ここで閉鎖木の樹冠幅 $w_{ci}(H)$ と同じ樹冠幅をもつ疎開木を考えてその樹高を記号 H_{ci} (以下この樹高を単に疎開木等樹高と呼ぶ)で表わすと、(2.22)式から閉鎖木の樹冠長は

$$L_i = 0.785H_{ci} \quad \dots\dots (2.40)$$

ここで、 L_i は \bar{S}_i 占有面積の仮想林分で樹高が H に達したときの立木の樹冠長、 H_{ci} は疎開木等樹高と表わされる。同様に閉鎖限界時の樹冠長は

$$L_i^* = 0.785H_{ci} \quad \dots\dots (2.41)$$

で表わされる。

以上の結果を利用すれば、仮想林分の各閉鎖段階における樹冠長比は、それぞれ次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{array}{ll}
 \text{閉鎖開始時 (H=H}_{o_i}\text{)} \cdots & R_o = L_{o_i}/H_{o_i} = 0.785 \\
 \text{閉鎖後 (H}_{a_i}\text{ < H < H}_{i}^*\text{)} \cdots & R_i = L_i/H = 0.785 H_{c_i}/H \\
 \text{閉鎖限界時 (H=H}_{i}^*\text{)} \cdots & R^* = L_i^*/H_i^* = 0.785 H_{c_i}^*/H_i^*
 \end{array} \right\} \cdots (2.42)$$

上で立木の樹冠長比に関してその生長上の意義について述べたが、実際にアカマツ林の枝打ち試験で、立木の樹冠長比が 0.18 以下に低下すると幹下部の直径生長の停止することが報告されている (細井ら²⁰ 1954)。§2-5 で明らかにするが、すでに自然枯死木の発生している過密なカラマツ人工林の調査から、樹冠長比 0.2 以下の立木の直径生長は、著しく衰え、さらに 0.16 前後に低下した立木は、ほとんど枯死状態に達していることが確認された。ここではこの結果に基づいて、閉鎖限界時の樹冠長比 R^* を 0.16 と定めることにした。この R^* の値を仮想林分に適用すると、閉鎖限界樹高 H_i^* は (2.42) 式から

$$H_i^* = L_i^*/R^* = 0.785 H_{c_i}^*/0.16 \cdots (2.43)$$

で与えられる。

依田¹⁰⁶ (1971) は、最多密度状態にある林分の平均樹高 h と占有面積 s との間に、自然間引の 3/2 乗則

$$h = K_2 s^{0.5} \quad (K_2 \text{ は定数})$$

の成り立つことを示している。一方、仮想林分において、先にあげた理由に基づいて樹冠長対樹冠幅の関係に (2.20) 式の疎開木の相対生長関係を適用し、変数を入れ替えて (両者の関係を決定的関係とみなして)、(2.34)。(2.42) 式を用いれば

$$\begin{aligned}
 H_i^* &= \frac{1.3009 \bar{S}_i^{0.558}}{R^*} \\
 &= 8.1306 \bar{S}_i^{0.558} \cdots (2.44)
 \end{aligned}$$

が導ける。この式は、仮想林分における占有面積と閉鎖限界樹高との関係を示すものである。(2.44) 式と上で示した 3/2 乗則式とは同形であるが、指数の値に若干の相違がみられる。この両者の相違は、3/2 乗則が立木の相似性を前提としている点に由来している。

以上によって求めた仮想林分の閉鎖進行過程のパラメーターを、それぞれの算出式をそえて表-2.4 に掲げた。

表-2.4 仮想林分の閉鎖過程のパラメーター
Table 2.4 Parameters of closing process of the hypothetical stand.

本密度	占有面積	疎開開始高	閉鎖限界樹高	疎開開始樹冠長	閉鎖限界樹冠長	疎開開始樹冠幅	閉鎖限界樹冠幅	閉鎖限界樹高
Number of trees per ha	Mean area per tree	Height begun to close	Height at closing limit	Crown length begun to close	Crown length at closing limit	Crown width begun to close	Crown width at closing limit	Equivalent height to open-grown tree at closing limit
i	\bar{S}_i	H_{o_i}	H_i^*	L_{o_i}	L_i^*	W_{o_i}	$W_{c_i}^*$	$H_{c_i}^*$
(本/ha)	(m^2)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
500	20.00	5.32	43.26	4.18	6.92	2.84	4.47	8.81
1,000	10.00	3.61	29.39	2.83	4.70	2.01	3.16	5.99
1,500	6.67	2.88	23.43	2.26	3.75	1.64	2.58	4.78
2,000	5.00	2.45	19.96	1.92	3.19	1.42	2.24	4.07
2,500	4.00	2.17	17.62	1.70	2.82	1.27	2.00	3.59
3,000	3.33	1.96	15.92	1.54	2.55	1.16	1.83	3.24
3,500	2.86	1.80	14.63	1.41	2.34	1.08	1.69	2.97
4,000	2.50	1.67	13.56	1.31	2.17	1.01	1.58	2.76

注) 算出式

$$\begin{aligned}
 \bar{S}_i &= 10,000/i & H_{o_i} &= \bar{S}_i^{0.558} & H_i^* &= 8.1306 \bar{S}_i^{0.558} & H_{c_i}^* &= 1.657 \bar{S}_i^{0.558} \\
 L_{o_i} &= 0.785 H_{o_i} & L_i^* &= 0.785 H_{c_i}^* & W_{o_i} &= 0.636 \bar{S}_i^{0.44} & W_{c_i}^* &= \bar{S}_i^{0.44}
 \end{aligned}$$

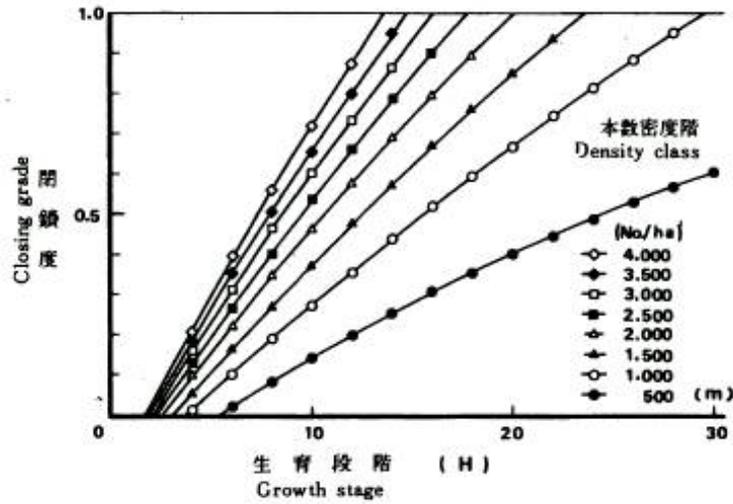


図-2.14 仮想林分の閉鎖度の推移
 Fig.2.14 Increasing trends of the closing grade with advancing growth stage in the hypothetical unthinned stands with different initial density.

た、これらのパラメーターの値によって本数密度階ごとの仮想林分の閉鎖度を算出し、その推移を図-2.14 に示した。

(2.28) 式において、樹冠幅 $W_{ci}(H)$ 、 W_{ci}^* をそれぞれの疎開木等樹高 H_{ci} および H_{ci}^* で置きかえれば、

$$P_i(H) = \frac{H^{0.8961} - C_{Hi} H_{ci}^{*0.8961}}{H_i^{*0.8961} - H_{ci}^{*0.8961}}, \quad (H_{oi} \leq H \leq H_i^*)$$

とおけて縦横の函数として表わされる。 $P_i(H)$ の値は、図-2.14 に認められるように、樹高に対してほとんど直線となる。そこで、閉鎖度を

$$P_i(H) = \frac{H - C'_{oi} H_{oi}^*}{H_i^* - H_{oi}^*} \quad (H_{oi} \leq H^*) \quad \dots\dots (2.45)$$

ここで、 C'_{Hi} は (2.33) 式で C_{Hoi} の代わりに $C'_o = C_{Hoi}^{\frac{1}{0.8961}}$ を用いたうっ閉比と近似しても十分である。

(2.45) 式で

$$\frac{1 - C'_o}{H_i^* - H_{oi}^*} = a_i$$

とおくと

$$\begin{aligned} P_i(H) &= \frac{1}{H_i^* - H_{oi}^*} [H - H_{oi}^* (a_i (H - H_{oi}^*) + C'_o)] \\ &= \frac{1}{H_i^* - H_{oi}^*} (1 - a_i H_{oi}^*) (H - H_{oi}^*) \end{aligned}$$

ここで

$$1 - a_i H_{oi}^* = 1 - \frac{(1 - C'_o) H_{oi}^*}{H_i^* - H_{oi}^*} = \frac{H_i^* - H_{oi}^*}{H_i^* - H_{oi}^*}$$

この関係を上の式に代入すれば

$$P_i(H) = \frac{H - H_{0i}}{H_i^* - H_{0i}}, \quad (H_{0i} \leq H \leq H_i^*) \quad \dots\dots (2.46)$$

がえられる。すなわち、(2.28) 式で定義された閉鎖度は、近似的に疎開樹高から閉鎖限界樹高に至る相対樹高で表わされることを示している。(2.46) 式で与えられる閉鎖度が近似値であることを示すために、記号に ' を付して以下では閉鎖度としてこの近似式を用いることにする。

(2.46) 式において $k_i = 1/(H_i^* - H_{0i})$, $\beta = k_i H_{0i}$ とおくと

$$P_i(H) = k_i H - \beta \quad \dots\dots (2.47)$$

ここで $P_i(H)$ の代わりに上 $P_i'(H)$ を用いて (2.31) 式のべき項の積分を行うと

$$-\int \frac{P_i(H)}{H^3} dH = -k_i H_0 + (\beta - 1.3k_i) \log H - C_i$$

ここで C_i は積分定数で

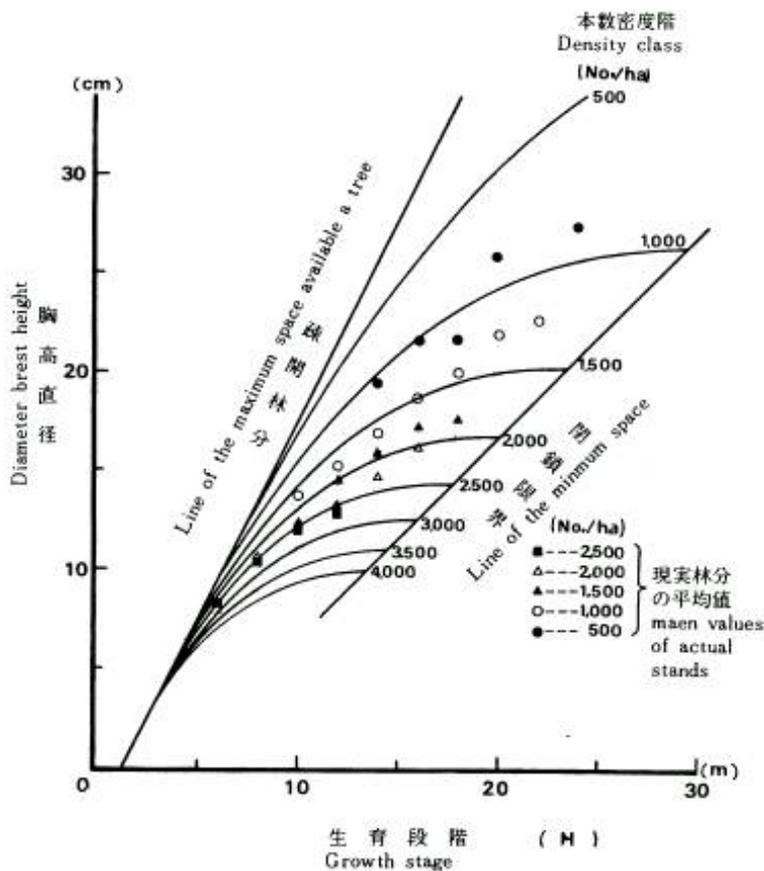


図-2.15 無間伐仮想林分の直径生長の推移
 Fig.2.15 Diameter growth in relation to height in the hypothetical unthinned stands. Where curve lines show d.b.h. computed by the eq.(2.48) and the dots represent mean d.b.h. in various actual thinned stands.

$$C_i = -k_i(H_{0i} - 1.3) + (\beta - 1.3k_i)\log(H_{0i} - 1.3)$$

この結果を (2.31) 式に代入して

$$D_i = 2.032H_{0i}e^{-k_i H_{0i}} H_{0i}^{\beta-1.3k_i} e^{-C_i}$$

ここで, $D_0 = 2.032H_{0i}e^{-C_i}$

$$D_i = a_i D_0 \left(\frac{e^{H_{0i}}}{H_{0i}^{\beta-1.3k_i}} \right)^{-k_i} \quad (1.3 < H_{0i} \leq H \leq H_i^*) \quad \dots (2.48)$$

とおくと

をえる。(2.48)式は仮想林分における立木の樹高対直径の相対生長モデルであり、閉鎖開始時から閉鎖限界時に至るまでの胸高直径の推移を示す式である。図-2.15に、このモデルによって求めた仮想林分の胸高直径の推移を掲げた。

(2) 幹形と相対生長モデル (i)

立木の枝打ちの研究や森林の生産構造の研究に関連して、立木の葉層の垂直分布と幹の垂直分布の量的関係が明らかにされてきている(尾中⁷²⁾1950, 細井ら²⁰⁾1954, 四手井ら⁸³⁾1960, 蜂屋¹⁷⁾1967, 齊藤ら¹⁹⁶⁸, 藤森¹⁴⁾1975)。これらの調査解析を通じて、針葉樹の幹の直径生長は、梢端から枝下高までの樹冠部分では、各層の着葉量に比例して増大するが、枝下部分の幹部では、一定かあるいは下方ほど減少するという結果が報告されている。すなわち、ある高さの層の幹材積生長量は、その層から上の積算葉量に比例するという関係が近似的に成り立ち(四手井ら⁸³⁾1960, 蜂屋¹⁷⁾1967, 斎藤⁷⁷⁾1968, 藤森¹⁴⁾1975), 葉で生産される同化物質の幹部への量的な配分法則を示すものと理解されている。(四手井ら⁸³⁾1960, 吉良²⁸⁾1965)。

また、立木密度と林分生産量との関係の研究面から、立木密度の高い林分の立木は、完満な幹形を呈し、疎な林分においては、梢殺の幹形となることが示されている(佐藤ら⁷⁹⁾1955, BRAATHE⁹⁾1957, LARSON⁴³⁾1963, NEWNHAM⁶⁰⁾1965, 安藤³⁾1968)。

一方、測樹学の分野においても、立木の幹形は、幹曲線や形状商および形数などの測定項目を通じて研究対象とされてきた。これらの測定項目のうち、胸高形数は立木の幹形を直接表わす尺度として、立木材積の測定に有効な方法を提供してきた。この胸高形数に対して、同一樹種であっても、地位、立木密度、枝下高などによって影響され、一般に、立木密度の高い立木ほど、また、枝下高の高い立木ほど大きくなることが指摘されている(堀田²¹⁾1927, 吉田¹⁰⁷⁾1930, 嶺⁵⁰⁾1952, 大隅ら⁷⁵⁾1971, 西沢⁶⁹⁾1972)。

前項の樹高対直径の相対生長モデルも、閉鎖による樹冠の垂直分布の変化と、それともなう幹の肥大生長量の垂直配分の関係を理論背景として導いたものである。ここで、その前提となった樹冠のうっ閉比の推移による立木の閉鎖モデルと、その結果から導かれた樹高対直径の相対生長モデルを適用して、立木の閉鎖過程ともなう幹形の変化の面から、前項の相対生長モデルについて検討を加えることにした。

上述した葉層の垂直分布と幹の肥大生長量との関係を直径生長量で見ると、図-2.16に掲げた解析例でみられるように、樹冠部では、その部分の着葉量に比例的に増加し、枝下部では幹の下方に向かって減少することが明らかである。この関係をさらに詳しく検討するために、カラマツの閉鎖木と疎開木をそれぞれ樹幹解析に供し、図-2.17に5年間隔の直径生長量を分離し、その垂直分布を年階順に配列させた。

- 2.17a の閉鎖木は、筆者ら³²⁾(1974)による狩勝峠旧鉄道防雪林の調査の際に設定された樹幹解析区の中の

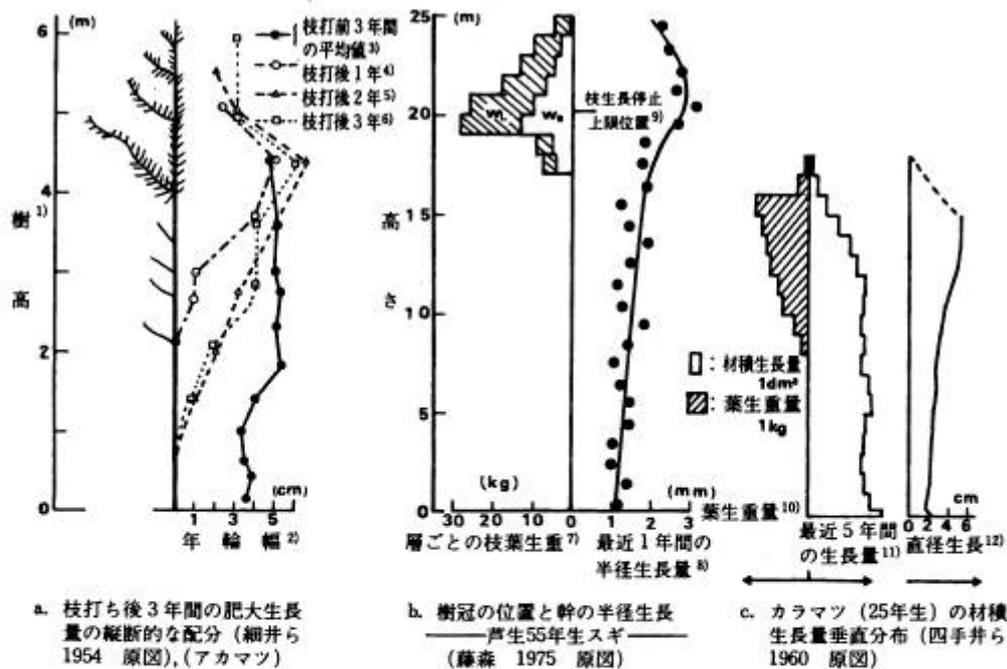


図-2.16 立木の樹冠の垂直分布と幹の肥大生長量との関係の解析例

Fig.2.16 Examples, shown by other wakers, of the relationships between vertical distribution of the crown strata and the radial increments.

a. Longitudinal distribution of radial increments during 3 years after pruning (from HOSOI *et al.* 1954 Fig.1.a *P. densiflora*), b. Position of the canopy and the growth in the radius of 55-years-old *C. Japonica* at Ashiu (from FUJIMORI 1975 Fig. 15), c. Vertical distribution of the volume growth of 25-years-old *L. leptolepis* (from SHIDEI *et al.* 1960 Fig.5).

Note 1) Height 2) Breadth of annual ring 3) Average of breadth of annual ring during 3 years before pruning 4) Breadth of annual ring in the first year after pruning 5) Breadth of annual ring in the second year after pruning 6) Breadth of annual ring in the third year after pruning 7) Fresh weight of branch and leaves in each vertical stratum 8) Growth in the radius of the stem in the latest one year 9) Highest line of the appearance of a stunted branch 10) Weight of fresh branch 11) Growth of stem volume during the latest 5 years period 12) Diameter growth during the latest 5 years period.

1本である。この立木は伐倒時(60年生)において、1,333本/haの本数密度に相当する7.5m²の占有面積³⁾を有していたが、調査時に確認された古い伐根や、立木の配列状態から幼始期から壮齢期にかけて、より高い本数密度での閉鎖を受けてきた立木と推定される。また、伐倒時において枝下部に落枝せずにいた枯死枝のうち、比較的直径の太いものについて年輪を数え、樹幹解析から求めたその高さに達するまでの年齢を加えて、枝の枯死年齢を推定した。これに、この林分を対象にして同時に実施された道立林産試験場による材質試験(小野寺ら⁷⁾1976)で明らかにされている枝の枯れ上がりの年齢を参照して、各年階の推定力枝高を求めた。

図-2.17aにみられるように、この閉鎖木の直径生長量の垂直分布は、立木の生育段階の進行にともなって、次第に変化するが、その分布型には、明らかに法則的なパターンを認めることができる。すなわち、樹高の上部から下方に向かって

- ①最上部の直線的に増加する部分
- ②直径生長量をもっとも大きく、ほぼ一定の分布を呈する部分
- ③下方に向かって減少する部分
- ④最下端部の再び増加する部分

注) § 2-5で述べる画定法による占有面積

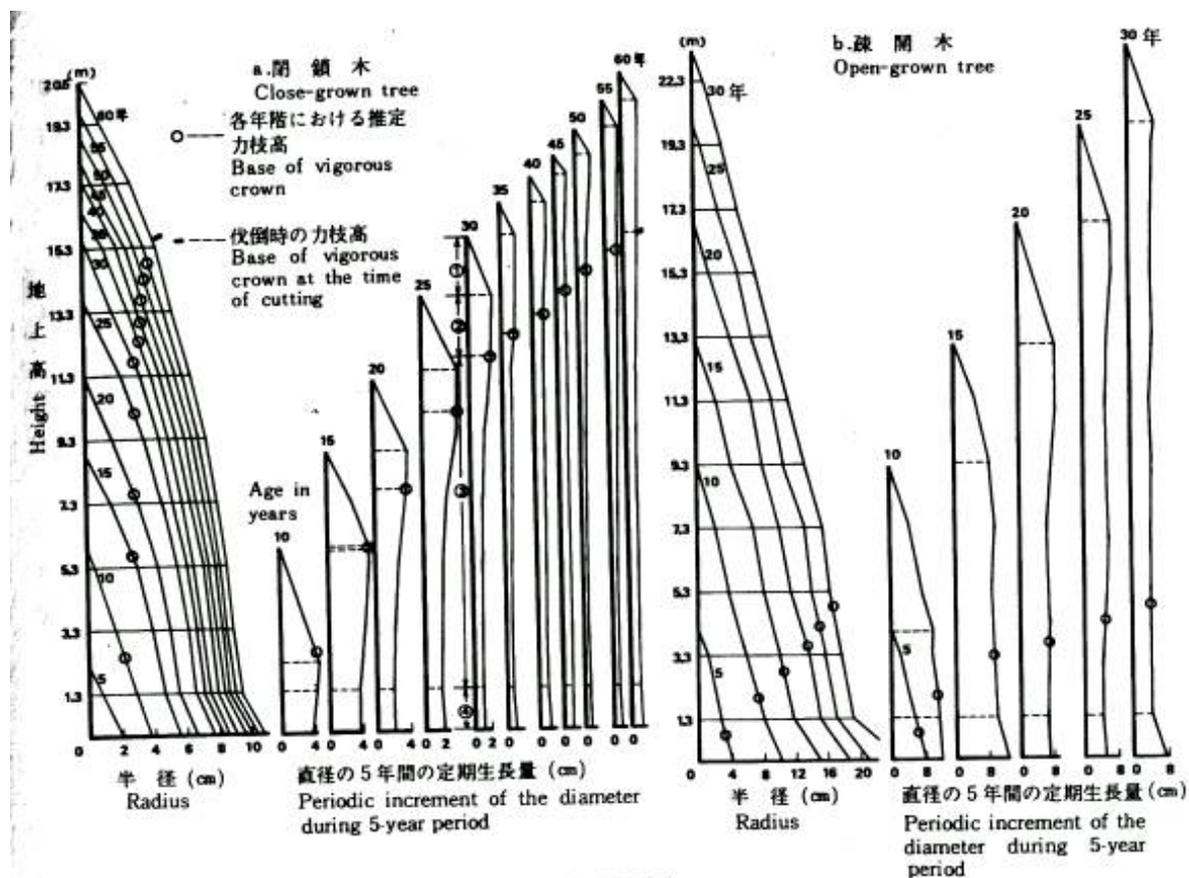


図-2.17 樹幹解析図と直径生長量の垂直分布
 Fig.2.17 Longitudinal distribution of the diameter growth in relation to clear length for close- and open-grown tree. Left figure represents vertical section of stem (stem analysis) and right is derived from left.

の4部分を認めることができる。

以上のような直径生長量の垂直分布のパターンは、葉で生産された同化物質の幹部への配分を受けてもたらされる幹の断面積生長の結果によるものである。幹上のある位置で、その断面積が ΔG だけ生長した場合に、その直径

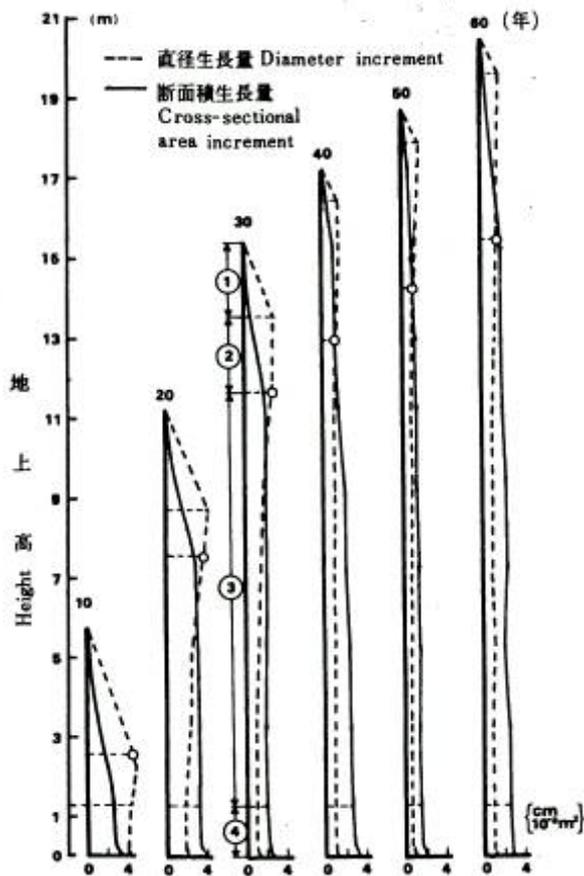
$$\Delta D_l = 2 \left(\sqrt{\frac{10,000 \Delta G}{\pi} + r^2} - r \right) \quad \dots\dots (2.49)$$

ここで、 ΔD_l は梢端から l の長さの位置における幹の直径生長量(cm)、 ΔG は同じ位置の断面積生長量(m³)、 r は同じ位置の期首における幹の半径(cm)

となる。図-2.17に掲げた閉鎖木の直径生長量の垂直分布のうち、各10年階について断面積生長量を対応させて図-2.18に再掲した。

①の部分は、当期の樹高生長、すやわち新梢部の直径生長部であり、力枝は少なくとも期首に、この部分の下に位置している。したがって、前項で述べたように、この部分については、梢端からの長さ、その位置の直径生長量との間に疎開木と同等な相対生長関係

$$\Delta D_l = (1 - 0.085) 2.032 l = 1.859 l \quad \dots\dots (2.50)$$



直径・断面積の5年間の定期生長量
Periodic growth of the diameter and cross-sectional area during 5-year period.

図-2.18 幹の直径生長量と断面積生長量の垂直分布

Fig.2.18 Longitudinal distribution of the cross-sectional area increment corresponding to diameter increment of the close-grown tree.

ここで、0.085 は樹皮厚率(樹皮厚/皮付直径)が期待される。実際に、各年階の測定値は、ほぼ上の関係にしたがっている。この結果、この部分の断面積生長量は、梢端からの長さの2乗に比例して増加する。すなわち

$$\Delta G_i = 0.00027 l^2 \quad \dots (2.51)$$

ここで、 ΔG_i 梢端からの長さ l における幹の断面積生長量

②の部分は、①の下端から力枝高までの幹部で、幹部の肥大生長に対して「もっとも貢献度の高い枝葉を有する層」(藤森 1975)を含む樹冠層の部分である。この部分についても、梢端からの長さ、その位置の直径との間に、疎開木と同等な相対生長関係が期待されるので、上の(2.50)式を用いて、この部分の直径生長量は

$$\begin{aligned} \Delta D_i &= 1.859 l - 1.859 (l - \Delta H) \\ &= 1.859 \Delta H (= \text{const.}) \end{aligned} \quad \dots (2.52)$$

ここで、 ΔH は当期の掛高生長で与えられる。すなわち、一定値となる。また、この直径生長量に対応する断面積生長量 ΔG_i は

$$\begin{aligned} \Delta G_i &= 0.00027 l^2 - (l - \Delta H)^2 \\ &= 0.00054 \Delta H \cdot l - 0.0027 \Delta H^2 \end{aligned} \quad \dots (2.53)$$

で表わされる。この式から明らかなように、この部分の断面積生長量は、梢端からの距離にしたがって直線的に増加する。

③の部分は、力枝高より下の幹部で、着葉量の著しく少ないか、あるいは、枝葉の完全に枯れ上がった部分である。したがって、先に引用した、葉で生産された同化物質の幹部への号的な配分法則—ある高さの位置の幹材積生長量は、その高さにより上の積算葉量に比例する—によれば、この幹部の断面積生長量はほぼ一定となる。すなわち、(2.49)式で ΔG が一定になるので

$$\frac{10,000 \Delta G}{\pi} = C (= \text{const.})$$

とおけば

$$\Delta D_i = 2 \left[\sqrt{\left(\frac{C}{r} + r \right)} r - r \right] \quad \dots (2.54)$$

の関係式がえられる。(2.54)式は、一定の断面積生長量によってもたらされる直径生長量が、期首の半径に逆比例することを示している。一般に、幹の下部ほど半径は大きいから、それに応じて直径生長量が少なくなる。

図-2.18に掲げた断面積生長量の垂直分布で、30年階までは、力枝高以下の断面積生長量がほぼ一定の分布を呈しているが、40年階以上では、幹の下方ほど増加する分布傾向が認められて、必ずしも上の法則性が一般的なものでないことが示唆されている。また、図-2.16の細井ら²⁰⁾(1954)によるアカマツの枝打ち試験の例で、典型的にみられるように、樹冠量が減少した場合には、それに応じて幹下部の断面積生長量も減少することが明らかである。

最後の④の部分の増加傾向は、根張りの影響によるもので、胸高より下の根際部分である。

初期の樹高の低い生育段階のうち、力枝高も低く、①の下端部か、あるいはその直下に位置するため②の部分が形成されない。この段階では、①の下端部に直径生長の最大部が位置する。生育段階の進むにしたがって、閉鎖が進行し樹冠の下部から枯れ上がり、力枝高は高くなる。しかし枯れ上がり速度が、樹高生長速度よりも劣るので、その結果、①の部分が減少し、②の部分が形成され、次第にその範囲が拡大する。

以上のように、閉鎖木の直径生長量の垂直分布は、閉鎖の進行にともなう葉層の相対的な縮小に応じて変化を遂げ推移してゆく。その変化の速さは、立木の閉鎖度によって左右され、本数密度の高い林分の立木、したがって、占有面積の小さい立木ほど、初期の生育段階のうちに、直径生長量の最大部分が、樹高の上部に移行してゆく。佐藤ら⁷⁹⁾(1955)のアカマツの立木密度試験の結果でも、このことが確認されている。

一方、閉鎖による枝葉の枯れ上がりのない疎開木は、図-2.17bにみられるように、③の部分はほとんど出現せず、①+②+④の分布型で推移してゆく。このような直径生長量の垂直分布の積み重なって形成される幹形は、完全な円錐体を呈することになり、ある高さの幹の直径とそれより梢端までの樹高との間に、常に比例関係が成り立つことになる。

以上から明らかなように、閉鎖木は、疎開木の直径生長量の垂直分布のうち、樹冠部の②の部分が、閉鎖効果をうけ減衰したものとみなすことができる。また閉鎖効果の及ばない①、②の部分の直径生長量の垂直分布は、疎開木と同じと考えることができる。・一「・」手

以上の分析結果と前項の無間伐林分の閉鎖モデルから、各部分の直径生長量を次のようにモデル化することができる。

①の部分($0 < l \leq \Delta H$)

$$\Delta D_l = 1.859 l \quad \dots (2.50)$$

ここで、 l は梢端から幹上の任意の位置までの長さ、 ΔD_l は l の位置の直径生長量、 ΔH は当期の樹高生長量

②の部分 ($\Delta H < l \leq L$)

$$\Delta D_l = 1.859 \Delta H \text{ (const.)} \quad \dots (2.52)$$

ここで L は樹冠長

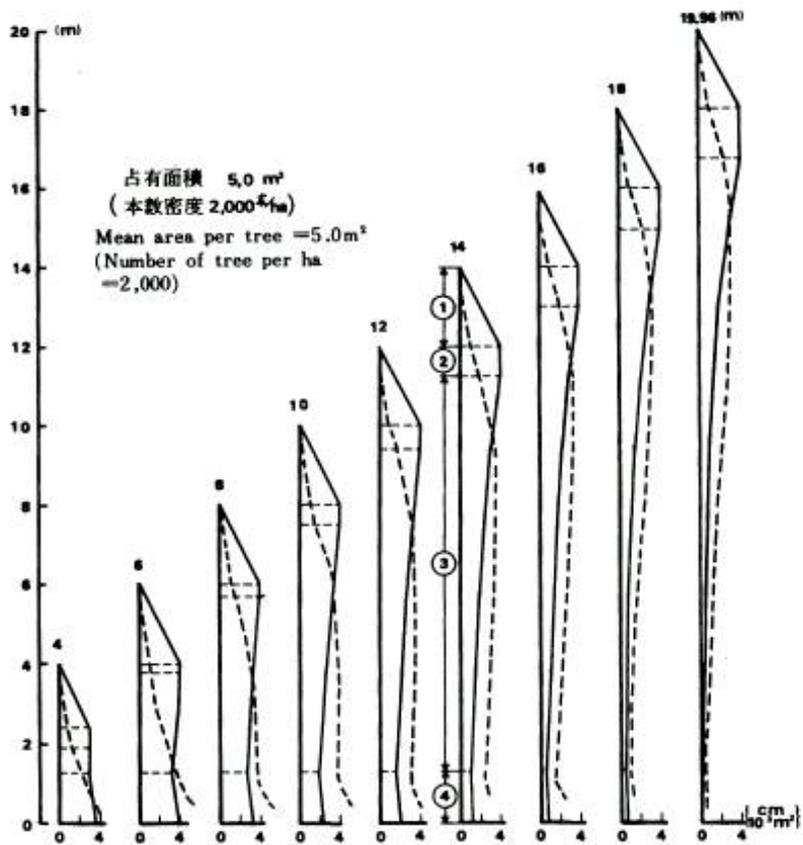
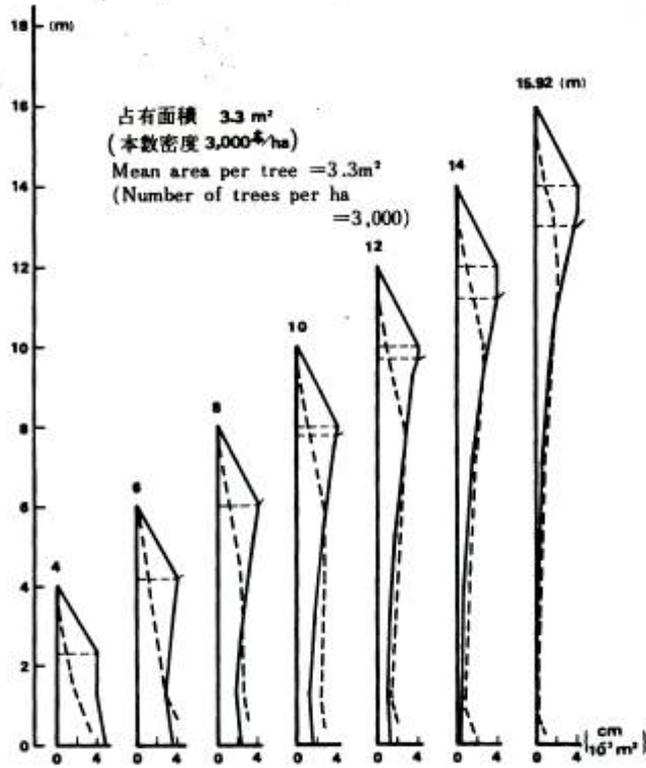
③の部分 ($L < l \leq H_B$)

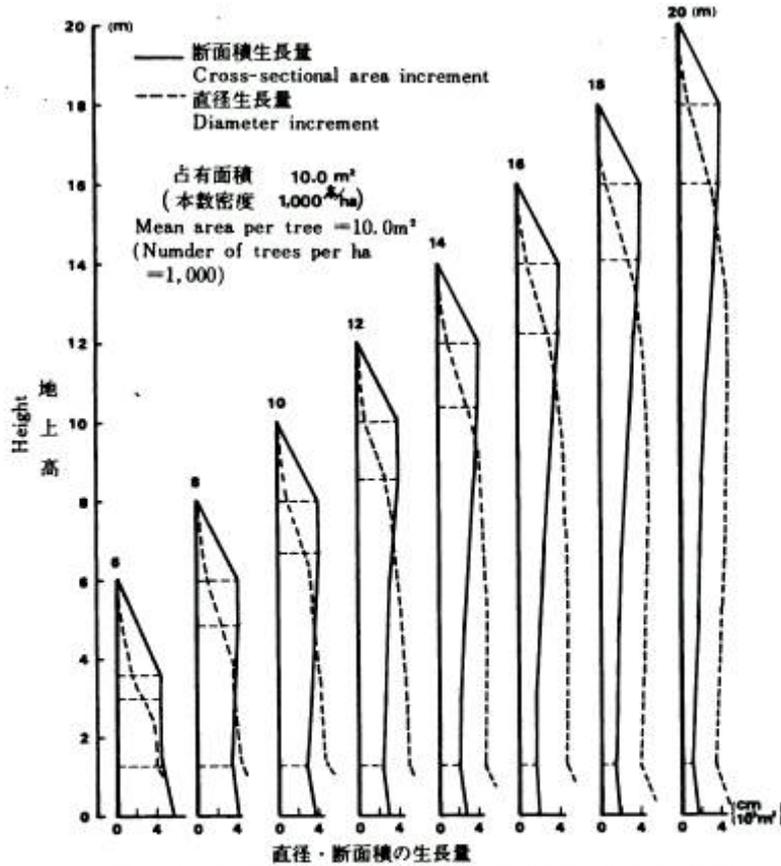
ここでは、上で検討した直径生長量の分布傾向が、力枝高から幹の下部に向って、幾何級数的に減少するものとみなして

$$\Delta D_l = \Delta D_L e^{-kl} \quad \dots (2.55)$$

ここで、 ΔD_L は力枝高の位置の直径生長量、 k は定数、 H_B は胸高樹高で表わすこととする。ここで、胸高直径を樹高対直径の相対生長モデル(2.48)式で与えることにし、期首の胸高直径を差し引いて、その期間の生長量を求める。すなわち、 $l = H_B$ の位置における直径生長量 ΔD_B を求めれば、定数 k は

$$k = -\left(\log \frac{\Delta D_B}{\Delta D_L} / l\right) \quad \dots (2.56)$$





Diameter and cross-sectional area increment with growing height of an interval of two meters.

図-2.19 無間伐仮想林分における立木の直径生長量の垂直分布の推移
 Fig.2.19 Transition of the longitudinal distribution of diameter and cross-sectional area increment in the hypothetical unthinned stand.

によって確定される。

④の部分($H_B < l \leq H$)

根張りの影響を考慮して、地際より 0.15m の高さの直径生長量が、胸高の直径生長量の 1.2 倍に相当するものとする。すなわち

$$\Delta D_{0.15} = 1.2 \Delta D_B \quad \dots (2.57)$$

ここで、 $\Delta D_{0.15}$ は地上高 0.15m における直径生長量

図-2.19 は、それぞれ 3.3 m^2 、 5.0 m^2 および 10.0 m^2 の占有面積を有する無間伐の仮想林分の立木について、樹高 2m 間隔の生育段階ごとに、上のモデルによって求めた直径生長量の垂直分布である。

このモデルによれば、本数密度の高い林分の立木ほど、下枝の枯れ上がりが急で、力枝高が高くなり、②の部分の出現範囲が狭くなる。それともなって、③の部分の直径生長量の下方への減少傾向が急になっている。また、それぞれの直径生長量に対応した断面積生長量の垂直分布を記入したが、その最大値は、いずれの場合も力枝高のやや下の高さで出現し、その大きさは樹冠長によって定まることが読み取れる。さらに、③の部分における断面積生長量の垂直分布は、樹冠長比によって左右され、樹冠長比の低下が幹下部の断面積生長量を減少させる結果となっ

ている。もっとも疎な本数密度での閉鎖過程を経てきた占有面積 10 m²の立木では、樹幹解析木の 40 年生以降と同様な傾向の断面積生長量の垂直分布が実現されている。また、樹高が 20m 以下で閉鎖限界に達する占有面積 3.3 m²と 5.0 m²の立木のそれぞれの生長後半期には、細井ら²⁰⁾ (1954) のアカマツ林の枝打ち試験でみられると同様な直径生長量とそれに応じた断面積生長量の垂直分布のタイプが実現されている。

図-2.20 は、上で求めた直径生長量の垂直分布を、生育段階の順に重ねてえられた幹の半縦断面図である。この幹形図は、樹幹解析と逆な手順によってえられたものであるが、樹幹解析による場合と同様にして、区分求積法によってモデル立木の幹材積が求められる。

図-2.20 から直観的にも明らかなように、強い閉鎖過程を経てきたモデル立木は、完満な幹形をなし、対照的に弱い閉鎖過程を経てきたモデル立木は、相殺な幹形を呈している。さらに、モデル立木について、それぞれの生育段階ごとの胸高形数を算出し、閉鎖度の推移に対応させて図-2.21 に示した。また、これらと比較対照するために、図-2.17a の樹幹解析木の各年階における胸高形数と、疎開木のモデル立木(正円錐体)の胸高形数の値を同じ図-2.21 上にプロットした。

胸高形数の推移は、正円錐体で表わされる疎開木のモデル幹形が典型的なものとみなされる。すなわち、正円錐体の胸高形数は、正常に生育してきたカラマツの立木について、生育段階ごとの胸高形数の下限値を示すもので、

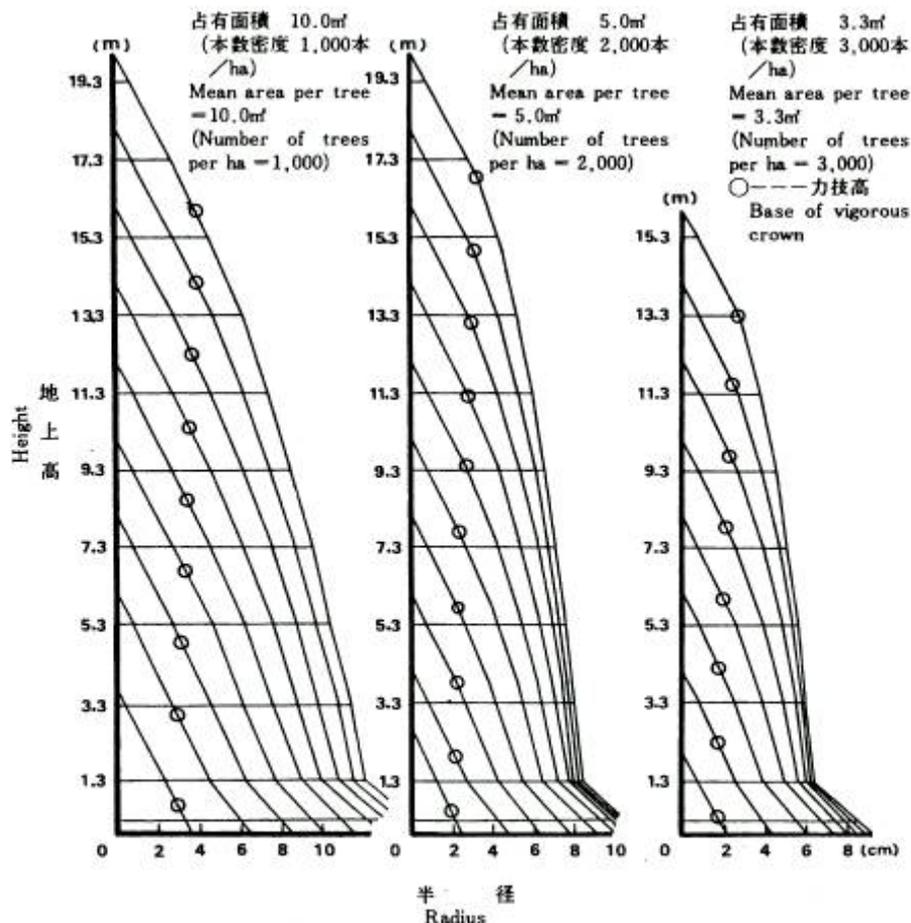


図-2.20 直径生長量の垂直分布モデルによる幹形(無間伐林分)の半縦断面
 Fig.2.20 Stem form simulated by the vertical distribution model of diameter increment for stand tree in the hypothetical unthinned stand.

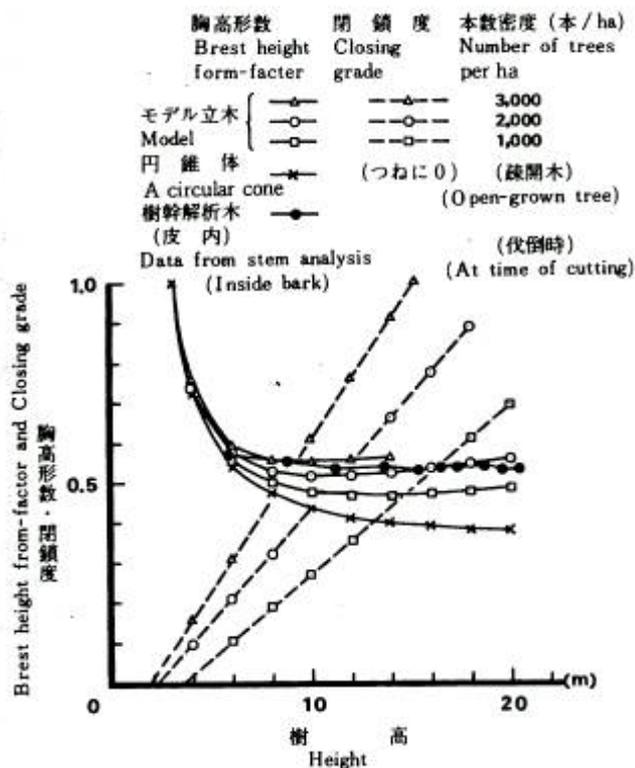


図-2.21 モデル立木 (無間伐) の閉鎖度と胸高形数の推移
 Fig.2.21 Tendencies toward cylindricity of stem simulated by the vertical distribution model in hypothetical unthinned stands with different initial density.

図-2.21 の横軸と縦軸上のそれぞれ 1.3m (胸高)と 1/3 の位置に漸近線を有する双曲線上をたどる。これに対して、閉鎖木のモデル立木は、生育段階にともなう閉鎖度の上昇を受けて、次第に胸高形数を高めて完満化する傾向をたどる。この場合に、明らかに占有面積の小さい立木ほどその傾向は早く、また顕著に現われる。

一方、現実林分の樹幹解析木の胸高形数についてみると、生育段階とともに、徐々に減少するという推移傾向を示している。このようなモデル立木との推移傾向の違いは、一定の占有面積のもとで経過するモデル立木に対して、樹幹畔析木は、隣接立木の枯死などによって、占有面積の拡大を経過してきており、このような両者の閉鎖過程の相違に起因するものと考えられる。吉田¹⁰⁷⁾(1930)は、樹高に対する胸高形数の推移傾向について、3つの基本型のあることを指摘しているが、ここで示した幹形モデルは、このような幹形の変化の推移に対して、立木の経てきた閉鎖過程によって説明するものである。この点については、次節で改めて検討を加えることにする。

以上で明らかにされた閉鎖過程の相違に基づく立木の胸高形数の推移は、本項のはじめで引用したように、いまままで共通して指摘されてきた幹形と立木密度、あるいは枝下高との関係に一致している。また、モデル立木と実測によった立木の胸高形数の値は、両者の閉鎖過程の相違を考慮すれば、きわめて近似したものとなる。このような結果は、閉鎖にともなう樹冠層の相対的な縮小が、幹の直径生長量の垂直分布に影響し、その結果立木の幹形を左右するとの考え方の正しさに立証を与えるものであろう。同時に、直径生長量の垂直分布のモデルに量的変化を与えた前項の閉鎖モデルと、それから誘導した樹高対直径の相対生長モデルの妥当性を示唆するものとみてよいであろう。

(3) モデルの適合性

立木の樹高と直径の両生長部分が、林分の閉鎖に対する反応の仕方を異にする性質を利用して、直径生長への閉鎖効果を説明する樹高対直径の相対生長モデル(2.48)式を導いた。このモデルは、立木の大きさ、その配置とも全く均一な仮相林分を前提としたものである。したがって、これに対応する林分は現実には存在せず、このモデルの適合性を直接的に確かめることはできない。近似的ではあるが、立木本数が一定に保たれた固定試験林で、継続してとられた平均樹高対平均直径の測定値が対応するものである。しかし実際にこのような対応資料も求めることができないので、ここでは、さらに第2近似として、現実の施業林分から測定された樹高対直径の関係との対応を試みた。

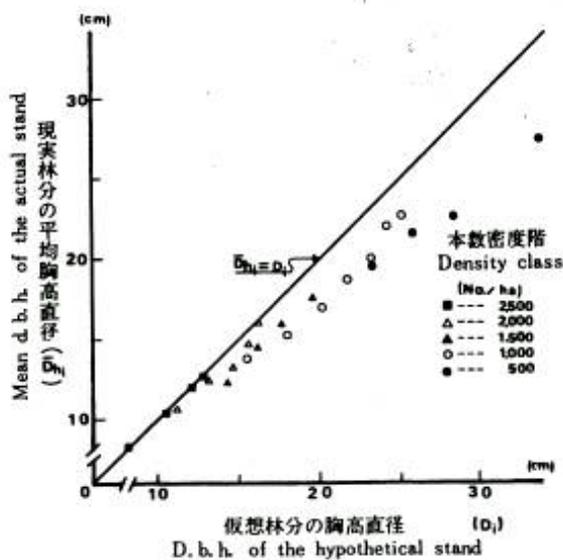


図-2.22 同じ生育段階の仮想林分と現実林分の直径生長の対比
 Fig. 2.22 Relationships between d.b.h. of the hypothetical unthinned stands and mean d.b.h. of the various actual thinned stands.

ここで用いた対応資料は、筆者も参画して調査が進められた北海道林務部による立地級調査¹⁹⁾(北海道林務部 1972)で収集された 453 箇所のカラマツ人工林の測定値である。各調査林分について、まず平均樹高および平均胸高直径を算出した。さらに算出された平均樹高によって調査林分を樹高階と本数密度階にクロス分類して、それぞれの級における平均胸高直径 \bar{D}_{hi} を算出した。この \bar{D}_{hi} と(2.48)式のモデルによって求めた胸高直径 D_i を対比するため図-2.22 に両者の関係をプロットして示した。

図-2.22 から明らかのように、現実林分から求めた平均直径は、モデルによる直径より過少であり、その傾向は本数密度階の低いほど著しいことが認められる。北海道地方のカラマツ人工林の植栽本数は、2,500 ~ 3,000 本/ha の範囲であり、ここで用いた貸料林分は、調査時に至るまで除、間伐その他の原因によって本数減少を経過してきたものである。したがって、過

去においてより高い本数密度の閉鎖を経過しており、立木本数を一定とする仮想林分の直径より常に小さい直径となる。また、その差は本数減少の多い低本数密度階ほど大となる。

調査林分のうちもっとも本数密度の高い 2,500 本/ha の本数密度階では、植栽後の立木本数の減少がわずかであり、ほぼ無間伐林に近い林分である。この本数密度階では、調査林分の平均直径と仮想林分の直径はほとんど一致する。以上の仮想林分と現実林分の直径生長過程の対応の結果から、間接的ではあるが(2.48)式のモデルの適合性を認めることができよう。

ここで利用した仮想林分は、きわめて単純化された林分である。しかし、仮想林分の閉鎖過程において、一般に認められているいくつかの生態学的知見が成り立っている。すなわち、閉鎖限界樹高と占有面積との間の近似的な 3/2 乗則の成立、また、一斉林では閉鎖後の林分葉量がほぼ一定で推移するという葉量一定の傾向(依田¹⁰⁶⁾1971 も、仮想林分ではごく粗い近似であるが満足されている。さらに、限界樹冠長比 R^* で立木が枯死するという現象も、植物の物質収支の面から根拠のあるところである。

以上のような一般的な林分生長の法則性が組み込まれている樹高対直径の相対長モデルは、林分生長モデル構成の基礎モデルとして、上の現実林分との間接的な対応関係とあわせて十分満足できるモデルと思われる。このモデルの前提となった(2.46)式で集約される閉鎖モデルの具体的なパラメーターの値については、最終的に構成される林分生長モデルのシミュレーションによって、試行錯誤的に実際現象と対応させて決定されるべきものである。

§ 2-4 間伐林分の樹高対面径の相対生長モデル

(1) 間伐林分の閉鎖モデル

現実林分は、除伐、間伐その他の原因による立木本数の減少をとめないながら生長する。これらの原因によって閉鎖林分中の立木が除去されるか、あるいは枯死すると、それに隣接する立木の生育空間が広がり、その立木の肥大生長が促進する。この現象がいわゆる間伐効果である。前節で定義した閉鎖度を用いれば、この間伐効果は、生

育段階における立木の閉鎖度の変化過程として表わされる。

前節の図-2.11 に掲げた仮想林分を再利用するが、さらに本数減少を受けた場合には、立木が自動的にそれぞれの位置を移動して、もとの方形配置に再配列するものとしておく。

いま、占有面積 \bar{S}_i の仮想林分(以下単に \bar{S}_i 林分と呼ぶ)が樹高 H'_i の生育段階で間伐されて占有面積が \bar{S}_j に変わったとする(以下このような林分を \bar{S}_{ij} 林分と呼ぶ)。この間伐によって疎開を受けた \bar{S}_{ij} 林分は図-2.23に示したように、同じ占有面積をもつ \bar{S}_i 林分の閉鎖系に移行する。疎開された直後の立木の樹冠は、直ちに变化することはないので、この間伐によって仮想林分における立木のうっ閉比は

$$C_{H'_i} = \frac{W_{ci}(H'_i)}{\bar{S}_i^{0.5}} \rightarrow C_{H'_{i-j}} = \frac{W_{ci}(H'_i)}{\bar{S}_j^{0.5}} \quad \dots (2.58)$$

ここで、 $C_{H'_i}$ は間伐直前の \bar{S}_i 林分における立木のうっ閉比、 $C_{H'_{i-j}}$ 間伐直後の \bar{S}_{ij} 林分における立木のうっ閉比、 $W_{ci}(H'_i)$ は間伐時の樹冠幅と变化する。よって間伐直後の \bar{S}_{ij} 林分における立木のうっ閉比は

$$C_{H'_{i-j}} = C_{H'_i} \left(\frac{\bar{S}_i}{\bar{S}_j} \right)^{0.5} \quad \dots (2.59)$$

となる。

このような疎開された \bar{S}_{ij} 林分の樹冠は、下層まで十分な陽光を受けるので、下層の枯れ上がり速度が鈍り、その結果 \bar{S}_j 林分の樹冠層に回復し閉鎖限界樹高 H_j^* に達する。この場合に、樹冠幅の拡張が無間伐の仮想林分と同様に直線

的と仮定すれば、 \bar{S}_{ij} 林分における立木のうっ閉比は

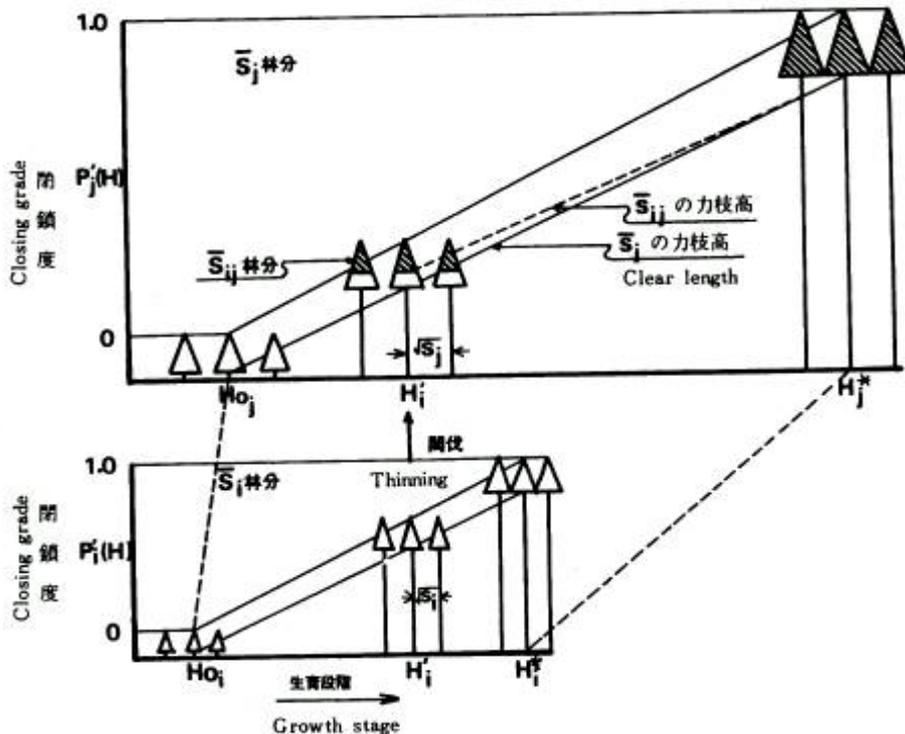


図-2.23 間伐による仮想林分の樹冠層の変化

Fig.2.23 An illustration of the canopy development in the hypothetical thinned stand. Where both \bar{S}_i and \bar{S}_j symbolises unthinned stand with initial density in number of trees per hectare i and j respectively and \bar{S}_{ij} represents the thinned stand with density j of which initial density has been decreased by thinning at growth stage H'_i .

$$C_{H_i} = \frac{1 - C_{H_{i-1}}}{H_i^* - H_i} (H - H_i) + C_{H_{i-1}} \quad \dots (2.60)$$

によって与えられる。図-2.23の斜線を施した樹冠層は、上の仮定にしたがった場合の \bar{S}_{ij} 林分の樹冠層の発達過程を示している。また、第2回目以後の間伐の場合も同様に仮定すると、仮想林分における立木のうっ閉比は図-2.24に示したように推移する。この場合に、樹冠の回復が上の仮定よりも遅れば、 \bar{S}_{ij} 林分は \bar{S}_j 林分より早い生育段階で限界樹冠長比 R^* に達して生長は停止する。しかし、このような現象は、樹冠長と樹冠幅の相対生長関係を考慮すると起りえない。

一方、間伐直後の \bar{S}_{ij} 林分の閉鎖度は、(2.28)の定義式によって

$$P_{ij}(H_i) = \frac{W_o(H_i) - W_{c_{ij}}(H_i)}{W_o(H_j^*) - W_{c_j^*}} \quad \dots (2.61)$$

ここで $P_{ij}(H_i)$ は間伐直後の \bar{S}_{ij} 林分の閉鎖度、 $W_{c_{ij}}(H_i)$ は間伐直後の \bar{S}_{ij} 林分の樹冠幅で与えられる。

ここで無間伐林分の場合と同様に近似式をとれば

$$P_{ij}(H_i) = \frac{H_i - C_{ij} H_{c_j^*}}{H_j^* - H_{c_j^*}} \quad \dots (2.62)$$

と表わすことができ、間伐によって分母の因子が変化することになる。よって間伐前後における閉鎖後の比をとると

$$\frac{P_{ij}(H_i)}{P_i(H_i)} = \frac{H_i - H_{c_j^*}}{H_j^* - H_{c_j^*}} = \frac{H_i - \left(\frac{R^* H_i^*}{0.785}\right)}{H_j^* - \left(\frac{R^* H_i^*}{0.785}\right)} = \frac{H_i}{H_j^*}$$

これから間伐直後の閉鎖度は

$$P_{ij}(H_i) = \frac{H_i}{H_j^*} P_i(H_i) \quad \dots (2.63)$$

によって与えられる。すなわち、この間伐による閉鎖後の低下分は

$$\Delta P_{ij}(H_i) = P_i(H_i) \left(1 - \frac{H_i}{H_j^*}\right) \quad \dots (2.64)$$

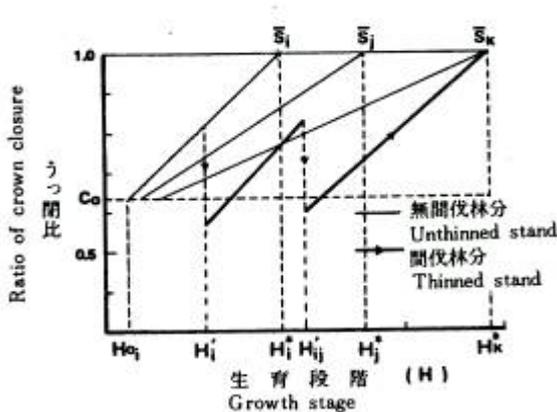


図-2.24 間伐仮想林分のうっ閉比の推移
Fig. 2.24 Transition of the ratio of crown closure with advancing growth stage in the hypothetical stand.

となる。現実林分の間伐において、間伐率が一定の場合には、閉鎖の進んでいる林分ほど、また、同じ閉鎖度合いの林分では、強度の間伐ほど疎開される度合いの大きいことは一般的に認められる現象である。上の(2.64)式において、 $P_i(H_i)$ は林分の閉鎖の進行度を示し、また $(1 - H_i/H_j^*)$ は、間伐強度に比例する項である。したがって、(2.63)式は間伐による疎開現象を一般的に説明するモデルといえる。

間伐以降の \bar{S}_{ij} 林分の閉鎖度は、樹冠のうっ閉比が直線的に上昇するという仮定から、

$$P_{ij}(H) = \frac{1 - P_{ij}(H_i)}{H_j^* - H_i} (H - H_i) + P_{ij}(H_i), \quad (H_i \leq H \leq H_j^*) \quad \dots (2.65)$$

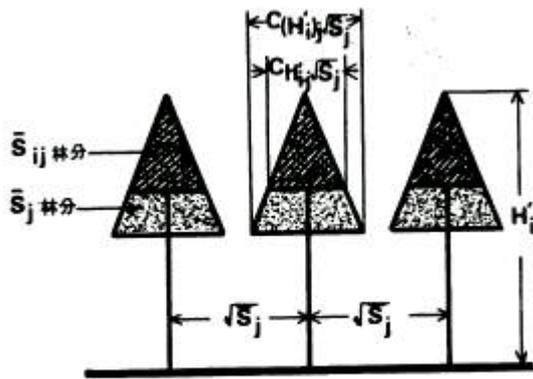


図-2.27 \bar{S}_{ij} 林分と \bar{S}_j 林分の樹冠層の比較
 Fig.2.27 A comparison between canopy of \bar{S}_{ij} and \bar{S}_j stand.

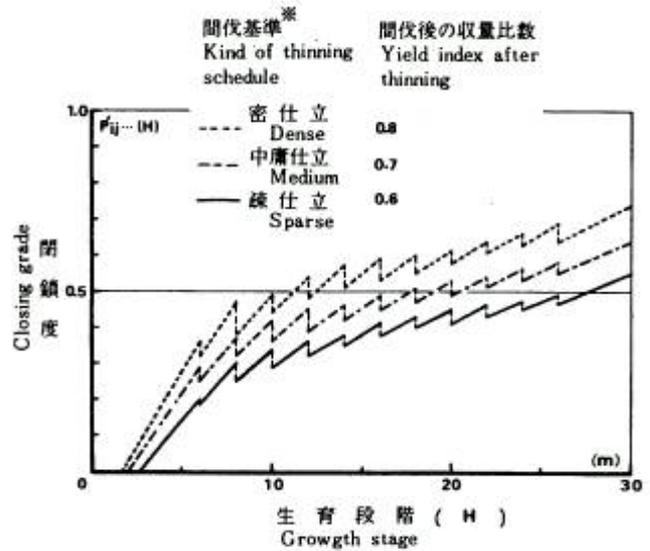


図-2.26 間伐仮想林分の閉鎖過程の数値例
 (* 信州地方カラマツ林分密度管理図 (安藤1968) による)
 Fig.2.26 Numerical examples of transition of closing grade with advancing growth stage according to three different thinning schedules for hypothetical stand.
 (* Data from Local density control diagram in Shinshu district of *L. leptolepis* (ANDO 1968).

ここで、 $P'_{ij}(H)$ は \bar{S}_{ij} 林分の樹高 H の生育段階における閉鎖度によって推移し、無間伐林分とは別な新たな閉鎖系をたどる(図-2.25)。2回目以降の間伐についても(2.63),(2.65)式と同様な関係が成り立つ。

仮想林分が、現実林分と同様に逐次本数減少をともなつて生育段階を進むとすれば、その都度、新たな閉鎖系にしたがつて生長してゆくことになる。このような林分のたどる閉鎖道程を模式的に

$$P'_{i-n}(H) = \begin{pmatrix} P'_i(H) \rightarrow P'_i(H'_i) \\ \downarrow \\ P'_{ij}(H) \rightarrow P'_{ij}(H'_{ij}) \\ \downarrow \\ P'_{ijk}(H) \rightarrow P'_{ijk}(H'_{ijk}) \\ \vdots \\ P'_{ijk-n}(H) \rightarrow P'_{ijk-n}(H_n^*) \end{pmatrix} \quad \dots (2.66)$$

$(H_{0i} \leq H \leq H_n^*)$

のように表わすことができる。すなわち、 $P'_{i-n}(H)$ は、 H_{0i} の生育段階で閉鎖した林分が、 $H'_i, H'_{ij}, H'_{ijk}, \dots$ の各生育段階で逐次間伐を受け、最終的に占有面積が \bar{S}_n となる仮想林分の閉鎖過程を表わすものである。なお、この模式で右辺の列は、林分の占有面積の変化方向を、また行は、生育段階の進行方向を示している。この模式によれば、林分の立木本数の変化にともなう閉鎖過程を統一的に表わすことができる。ここでは(2.66)式を閉鎖過程式と呼ぶことにする。

図-2.26 は、閉鎖過程式の数値例を図示したもので、仮想林分に対して信州地方カラマツ林分密度管理図(安藤 1968)で3種の間伐基準にしたがつた間伐を適用した場合の例である。

以上のように仮想林分は間伐による立木本数の減少を受けるごとに、新たな閉鎖系を経過する。それともなつて、樹高対直径の相対生長関係も変化することになる。すなわち、 \bar{S}_i 林分が樹高 H'_i の生育段階で間伐を受け、占有面積を \bar{S}_j 有する \bar{S}_{ij} 林分に変つた場合に、この閉鎖系では

$$\frac{dD_{ijk-n}}{D_{ijk-n}} = \frac{dH_n}{H_n} \gamma_{ijk-n} |1 - P'_{ijk-n}(H)|, \quad \dots (2.69')$$

$(1.3 < H_{0i} \leq H \leq H_n^*)$

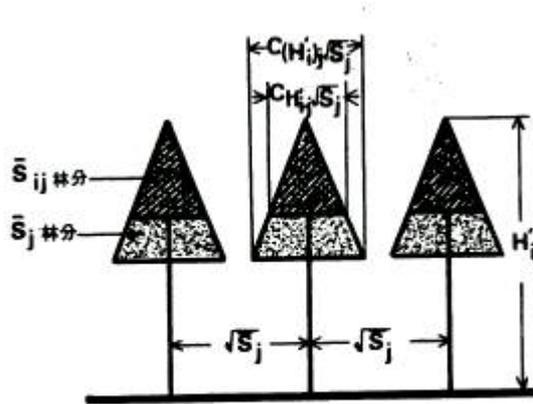


図-2.27 \bar{S}_{ij} 林分と \bar{S}_j 林分の樹冠層の比較
Fig.2.27 A comparison between canopy of \bar{S}_{ij} and \bar{S}_j stand.

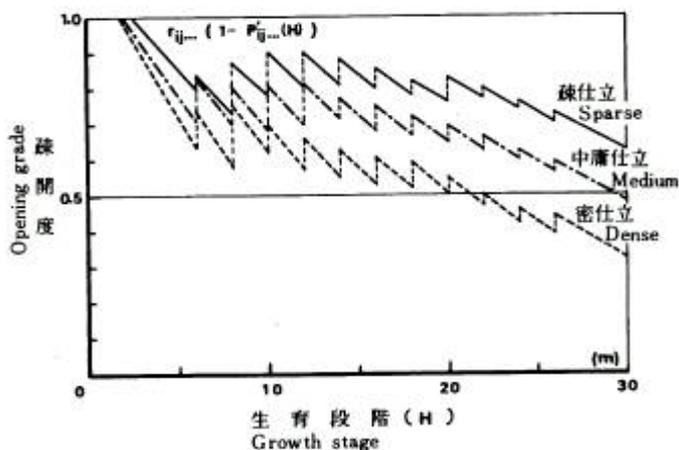


図-2.28 間伐仮想林分の疎開度の推移
Fig.2.28 Transition of the opening grade with advancing growth stage according to the same thinning schedule as Fig.2.26 for the hypothetical stand.

ここで、 D_{ij} は \bar{S}_{ij} 林分における立木の胸高直径、 $P'_{ij}(H)$ は同じ林分における立木の閉鎖度

が成立することになる。

(2.67)式は、直径生長に対する間伐効果を占有面積の拡大にともなう樹冠量の回復という、いわば物理的側面のみを考慮に入れた式ということになる。一方、図-2.27 に示したように、間伐直後の仮想林分の樹冠層は、間伐林分と同じ占有面積、同じ生育段階の無間伐林分の樹冠層に比べてより疎開状態にある。依田¹⁰⁶⁾(1971)によれば、葉の同化能率を表わす純生産率は、葉の少ない林分ほど高くなる。この原因として、葉の少ない森林ほど葉による相互被陰が少なく、単位葉面積当りの受光量

が増加するためと説明されている。間伐は人為的に林分葉量を減少させるものであり、陽樹で純生産率の高いカラサツは、一層その効果の大きいことが予想される。したがって間伐効果にこのような生理的効果を見込む必要がある。

ここで、葉の同化能率が樹冠層の疎開の度合いに比例するものと考えれば、 \bar{S}_{ij} 林分の同化能率を同じ生育段階の無間伐の \bar{S}_j 林分を基準にして

$$\gamma_{ij} = \frac{C(H'_{ij})}{C(H_{ij})} \quad \dots (2.68)$$

ここで、 $C(H'_{ij})$ は間伐直後の \bar{S}_{ij} 林分と同じ生育段階にある \bar{S}_j 林分のうつつ閉比、 $C^*_{H_{ij}}$ は間伐直後の \bar{S}_{ij} 林分のうつつ閉比

によって表わすことが考えられる。 γ_{ij} は、いわば疎開にともなう立木の生理的効果を示すものであり、その意味から疎開係数と呼ぶことにする。疎開係数を(2.67)式に組み入れて、新たに \bar{S}_{ij} 林分の樹高対直径の相対生長関係を

$$\frac{dD_{ij}}{D_{ij}} = \frac{dH_{ij}}{H_{ij}} \gamma_{ij} (1 - P'_{ij}(H)), \quad (H'_{ij} \leq H \leq H'_{ij}) \quad \dots (2.69)$$

と表わす。ここで、 $\gamma_{ij}(1 - P'_{ij}(H))$ の項は、間伐効果の面からみた疎開度を与えるものである。図-2.26 に用いた閉鎖過程式の数値例についての疎開度の推移を図-2.28 に示した。

(2.69)式を解けば乱林分の樹高対直径の相対生長モデルが与えられる。一般に閉鎖過程式 $P'_{i-n}(H)$ にしたがう間伐仮想林分の場合は、次の漸化式で表わされる。

$$\begin{aligned}
\bar{S}_i \quad \text{林分} \cdots D_i &= \alpha_i D_0 e^{-k_i H} H_B^{k_i (H_{0i} - 1.3)} & (1.3 < H_{0i} \leq H \leq H_i^*) \\
\bar{S}_{ij} \quad \text{林分} \cdots D_{ij} &= \alpha_{ij} D_0^{\tau_{ij}} e^{-k_{ij} H} H_B^{k_{ij} (H_{ij}^* - \tau_{ij} P'_{ij}(H_i))} & (H_i^* \leq H \leq H_{ij}^*) \\
\bar{S}_{ijk} \quad \text{林分} \cdots D_{ijk} &= \alpha_{ijk} D_0^{\tau_{ijk}} e^{-k_{ijk} H} H_B^{k_{ijk} (H_{ijk}^* - \tau_{ijk} P'_{ijk}(H_{ij}^*))} & (H_{ij}^* \leq H \leq H_{ijk}^*) \\
&\vdots & \vdots \\
\bar{S}_{ijk \cdots n} \quad \text{林分} \cdots D_{ijk \cdots n} &= \alpha_{ijk \cdots n} D_0^{\tau_{ijk \cdots n}} e^{-k_{ijk \cdots n} H} H_B^{k_{ijk \cdots n} (H_{ijk \cdots n}^* - \tau_{ijk \cdots n} P'_{ijk \cdots n}(H_{ijk \cdots n}^*))} & (H_{ijk \cdots n}^* \leq H \leq H_n^*)
\end{aligned}$$

... (2.70)

ここで一般に,

$$k_{ij \cdots} = \tau_{ij \cdots} \left\{ \frac{1 - P'_{ij \cdots}(H_{ij \cdots}^*)}{H_n^* - H_{ij \cdots}^*} \right\}$$

$$H_{ij \cdots}^* = H_{ij \cdots} - 1.3$$

$\alpha_{ij \cdots}$ は積分定数

(2.70) 式の定数 $\alpha_{ij \cdots}$ は

$$\begin{aligned}
\alpha_i &= \frac{1}{K_{0i}} \\
\alpha_{ij} &= \frac{\alpha_i K_i}{K_{ij}} |2.032 (H_{ij}^*)|^{1-\tau_{ij}} \\
\alpha_{ijk} &= \frac{\alpha_{ij} K_{ij}}{K_{ijk}} |2.032 (H_{ijk}^*)|^{\tau_{ij} - \tau_{ijk}} \\
&\vdots \\
\alpha_{ijk \cdots n} &= \frac{\alpha_{ijk \cdots n} K_{ijk \cdots n}}{K_{ijk \cdots n}} |2.032 (H_{ijk \cdots n}^*)|^{\tau_{ijk \cdots n} - \tau_{ijk \cdots n}}
\end{aligned}$$

... (2.71)

ここで

$$K_{0i} = e^{-k_i (H_{0i} - 1.3)} (H_{0i} - 1.3)^{k_i (H_{0i} - 1.3)}$$

一般に

$$K_{ij \cdots} = e^{-k_{ij \cdots} (H_{ij \cdots}^* - 1.3)} (H_{ij \cdots}^* - 1.3)^{k_{ij \cdots} (H_{ij \cdots}^* - 1.3)}$$

によって与えられる。

(2.26) の閉鎖通過式 $P'_{i-n}(H)$ にしたがう閉鎖林分の直径の推移を、閉鎖過程式に対応させて表わせば

$$D_{i-n}(H) = \begin{pmatrix} D_i(H) \rightarrow D_i(H_i^*) \\ \quad \downarrow \\ D_{ij}(H) \rightarrow D_{ij}(H_{ij}^*) \\ \quad \downarrow \\ D_{ijk}(H) \rightarrow D_{ijk}(H_{ijk}^*) \\ \quad \vdots \\ D_{ijk \cdots n}(H) \rightarrow D_{ijk \cdots n}(H_n^*), \\ \quad \quad \quad (H_{0i} \leq H \leq H_n^*) \end{pmatrix}$$

... (2.72)

ここで、 $D_{ij \cdots}(H)$ は樹高 H の生育段階に達した $\bar{S}_{ij \cdots}$ 林分の胸高直径を表わす

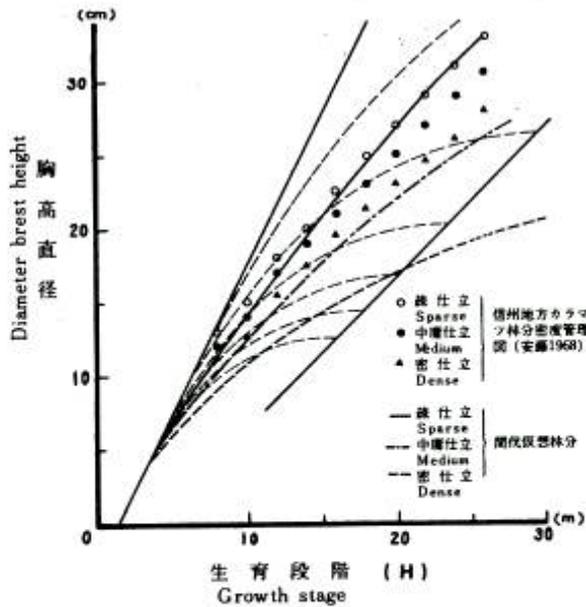


図-2.29 間伐仮想林分の直径生長の推移
 Fig. 2.29 Diameter growth in relation to height in the hypothetical thinned stands. Where curve lines show d.b.h. computed by the eq. (2.70) and the dots represent mean d.b.h. derived from Local stand density control diagram in Shinshu district of *L. leptolepis* (ANDO 1968).

と書くことができる。

ある1つの $P'_{i-n}(H)$ にしたがう仮想林分について、一意的に $D_{i-n}(H)$ が定まることになる。したがって、同一の生育段階に達して、同一の立木本数を有する林分でも、異なった閉鎖過程式にしたがった場合には、それぞれに対応した異なった直径生長の推移を経過してきていることになる。

$D_{i-n}(H)$ の数値計を電子計算機によって求めるためのプログラム(ALLOMETRIC MODEL OF CLOSED STAND)を組み、これによって図-2.26の数値例の場合の $D_{i-n}(H)$ を算出して図-2.29に示した。

(2) 幹形と相対生長モデル(ii)

前節(2)と同様な直径生長量の垂直分布モデルを間伐想林分に適用して、モデル立木の幹の半縦断面を求め図-2.30に示した。この例は、図-2.26に用いた疎中庸密位立のそれぞれの閉鎖過程をたどる間伐仮想林分に対して適用したものである。無間伐の場合と同様に、本数密度の高い

閉鎖過程を経た林分の立木ほど完満な幹形を呈している。

図-2.30の各モデル立木の胸高形数を算出して図-2.31にその推移を示した。この図上に狩勝峠旧鉄道防雪林の調査(小林ら³²⁾1974)で樹幹解析した11本の立木の胸高形数の値をプロットした。この林分の本数密度は558本/haで、ほぼ中庸仕立の密度管理基準に相当する。密仕立および疎仕立のモデルの胸高形数は、これらの実測値の分布範囲のほぼ上端と下端をそれぞれ推移している。そして中庸仕立のモデル立木の胸高形数は、上の両者のほぼ中間を推移し、実測値の平均的な値を示している。また、この図上に、疎仕立林分の初期立木本数と同じ2,000本/haの無間伐仮想林分のモデル立木の胸高形数をプロットした。この初期立木本数を同じくする両林分の胸高形数の推移を比較することによって、幹形に与える間伐の影響を知ることができる。すなわち、逐次間伐によって疎開される林分の立木は、幹下部の肥大生長の低下が防がれて、その結果、胸高形数の上昇傾向が鈍り、実測値で認められるような横ばい状態で推移する。

以上のように、間伐林分に対する樹高対直径の相対生長モデルを前提とした立木の直径生長量の垂直分布モデルによって、現実林分の立木とほぼ一致する幹形を実現させることができ、さらに林分の本数密度と幹形の関連について一般的な説明を加えることができた。

(3) 樹高対直径の相対生長モデルの一般化

生育段階の進行にともなって、逐次立木本数を減少する間伐林分に対応する樹高対直径の相対生長モデルとして、樹冠層の疎開による樹冠の回復と、さらに立木の生理的効果を見込んで

$$\frac{dD_{ijk-n}}{D_{ijk-n}} = \frac{dH_n}{H_n} \gamma_{ijk-n} |1 - P'_{ijk-n}(H)|, \quad \dots (2.69')$$

(1.3 < H_0 ≤ H ≤ H_n)

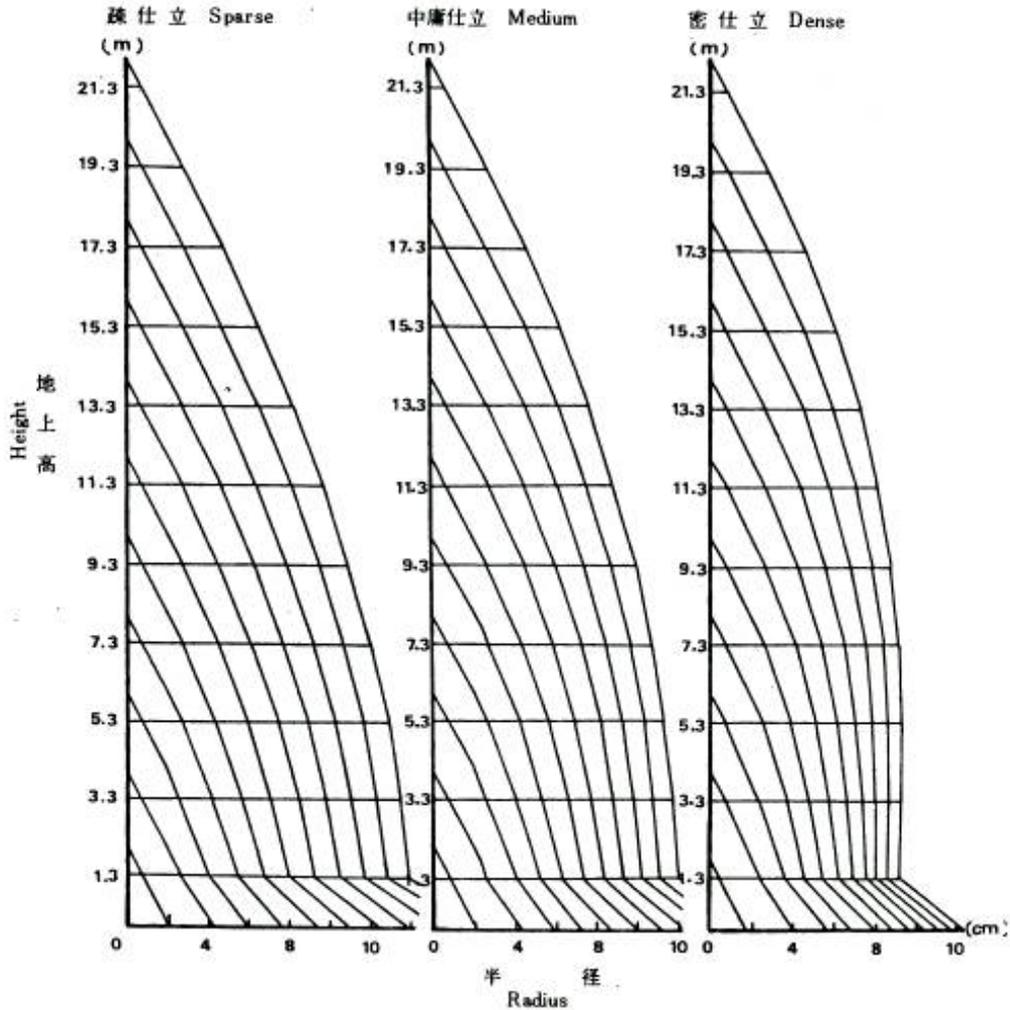


図-2.30 直径生長量の垂直分布モデルによる幹形(間伐林分)の半縦断面
 Fig.2.30 Stem form simulated by the vertical distribution model of diameter increment for stand tree in the hypothetical thinned stand.

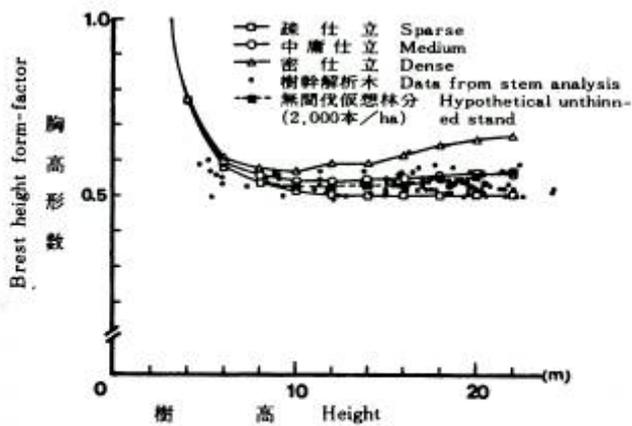


図-2.31 モデル立木(間伐林分)の胸高形数の推移
 Fig.2.31 Tendencies toward cylindricity of stem simulated by the vertical distribution model in the hypothetical thinned stands.

を導いた。ここで、無間伐林分では疎係数を

$$T_{u..t} = 1$$

また、閉鎖度を $P'_{u..t}(H) = P'_t(H)$

... (2.73)

と規定しておけば、(2.69)式は閉鎖林分一般に適用できる樹高対直径の相対生長モデルとなる。

また、樹高が H'_i に達した \bar{S}_i 林分を、その後の生育段階の進行にともなって、常に一定の閉鎖度を保つように連続的に立木本数を減少させたと仮定すれば、(2.69)式で

$$T_{ijk..} = 1, P'_{ijk..}(H) = P'_i(H'_i) (= const)$$

とおけて、この積分型は

$$D_{ijk...} = \alpha H_i^{1-P_i(H_i)}, \quad (H_i \geq H_i - 1.3) \quad \dots (2.74)$$

ここで、 $D_{ijk...}$ は占有面積 \bar{S}_i の仮想林分が、樹高 H_i' に達して以後に、閉鎖度を定に保った場合の立木の胸高直径、 α は H_i' のときの胸高直径によって定まる定数となる。(2.74)式は明らかに $1 - P_i(H_i')$ を相対生長係数とする allometry 式である。さらにここで、閉鎖度を

$$P_i(H_i) = P_i(H_{0i}) = 0$$

とおけば、相対生長係数が 1 となり疎開木の樹高対直径の allometry 式となる。以上によって明らかのように、(2.69)式は(2.73)式の規定によって疎開木から閉鎖木にわたって適用される樹高対直径の相対生長モデルに拡張される。なお、閉鎖度が一定に保たれる仮想林分においては、立木の樹冠長比もまた一定となり、立木の相対的な樹冠量が一定で推移することを意味している。

以上のように、本節で導いた間伐林分に対するモデルは、前節の無間伐林分のモデルが拡張されたものである。したがって、無間伐モデルの適合性の検討結果と、本節(2)項における直径生長丘の垂直分布による幹形モデルの適合性とをあわせて考慮すれば本節で導いた樹高対直径の相対生長モデルは、間伐林分における立木の直径生長の推移を表わすモデルとして妥当性のあるものといえることができるであろう。

試みに、閉鎖過程式の数値例として用いた信州地方カラマツ林分密度管理図によった3種の間伐基準の直径生長過程(間伐後の胸高直径)と、間伐仮想林分に同じ閉鎖過程をたどらせた場合の直径生長過程を図-2.29上で対応させた。疎仕立の閉鎖過程の場合には、両者は近似した生長過程をたどるが、中庸および密仕立の間伐基準の場合には、両者のずれは大きい。ここで、立木の大きさ、その位置とも均一な仮想林分を下層間伐を前提として作られている密度管理図と直接対応することはあまり意味をもたないが、両者の差は間伐効果の評価の仕方にも由来しているものと考えられる。相対生長に理論的根拠をおく樹高対直径の相対生長モデルでは、幹の直径生長を自己増殖過程としてとらえて間伐効果の評価するものであって、密度管理図による間伐モデルとはこの点で異なっている。

§ 2-5 閉鎖林分における単木の占有面積モデル

(1) 占有面積の定義域とその画定法

閉鎖した一斉林において、近接している立木は、光の被陰作用などを通じて相互の生長に影響し合っている。西沢(1966⁶⁷, 1969⁶⁸)は、角度加算法を用いれば、限界断面積定数の大きさによって、中心木の肥大生長に影響を及ぼす隣接木のランクが自動的に定まるとし、ほぼランク 10 までの立木が有意な影響を与えていることを示している。また、OPIE⁷⁴(1968)の提示した Zone count 法も同様な考え方の1つの表現であり、胸高直径の一定倍率の拡大円をその立木の影響圏と定め、隣接木との重複面積によって立木の受けている競争度合いを表わそうと試みたものである。この両者ともに、隣接木の生長に影響を及ぼす範囲は、立木の胸高直径の大きさに比例するという共通した考え方に立っている。

上のよう考え方に基づけば、完全に閉鎖した林分内の任意の地点は、少なくとも1本以上の立木の影響圏内に位置することになる。いま、複数の立木の影響圏内にある地点は、その地点にもっとも強く影響を及ぼしている立木の影響圏に属するものと定めれば、林分内において、各立木が優占的に利用している林地の面積範囲を画定することができる。この面積範囲は、林分内における個体の生活圏ともみなされるものもその意味からここで、この面

積範囲を単木の占有面積の定義域と定める。

前2節の仮想林分では、単木当りの林地面積を占有面積としてきた。立木の大きさ、その位置とも斉一な仮想林分では、単木当りの林地面積と上で定義した占有面積は一致する。一方、大きさ、位置とも不齊な立木からなる現実林分では、それぞれの立木が異なる占有面積を有していることになる。単木の占有面積として、BROWN⁸⁾(1965)はAPA(Area potentially available atree)を提示している。APAは対象木から隣接木のそれぞれに直線を引き、直線の垂直2等分線の交点を結んでできる多角形の面積である。BROWN⁸⁾はAPAを林分の点密度(point density)の指標と考えたが、このような方法によるAPAは、立木の大きさに関係なく、隣接木の位置のみによって定められることになる。Jack(1967)はこの点をAPAの欠点として指摘し、これを補うために対象木と隣接木との樹高比によって両者間の距離の分点を定める方法を提案した。また、SCHULS⁸¹⁾(1968)は、樹高比の代わりに胸高直径比を用いる方法を示している。

電子計算機に立木位置を記憶させ、単木の占有面積を求める場合に、上のような分点法では、そのプログラム化が厄介であり、またいずれの立木にも属さない空白の部分が生じる。筆者³⁴⁾(1970)は分点法に代って、立木位置図上を方形のメッシュでカバーし、各格子点がどの立木に占有されるかを判定する方法を提案した。例えば、周囲の立木に及ぼす影響範囲が、立木の胸高直径に比例するものとした場合には、格子点からその周囲の立木までの距離 L_{ij} (i は格子点番号、 j は立木番号)と、立木の胸高直径 D_j との比 D_j/L_{ij} が最大値を示す立木を、 i 格子点を占有する立木と判定する。

D_j/L_{ij} の値によって各格子点の占有木を判定し、同じ立木に占有される格子点群を区画すれば、その立木の占有面積が画定される。図-2.32は、このようなメッシュ法による占有面積の画定例を示したものである。メッシュ間隔を Δh とすれば、1つの格子点の有する面積 A は、 $A=\Delta h^2$ である。よって、 j 立木の占有面積を S_j とすれば $S_j = n_j A$ は j 立木に占有されている格子点の箇数となる。この場合、占有面積の精度は、メッシュ間隔に依存するが、一般の閉鎖林分では0.5mのメッシュで実用上十分であろう。

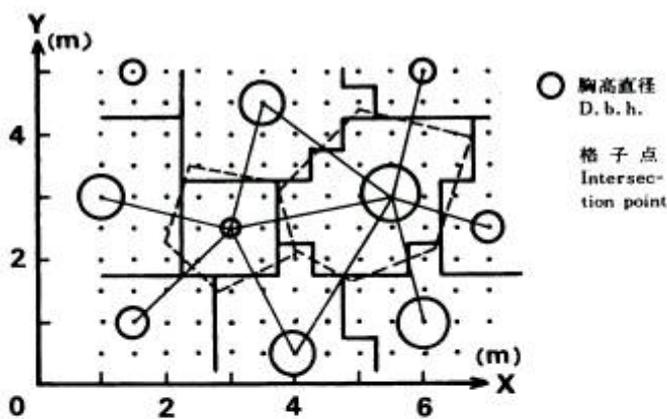


図-2.32 メッシュ法(D_j/L_{ij})による占有面積の区画 (点線は分点法による占有面積)

Fig. 2.32 Mesh method, using judgment factor in D_j/L_{ij} , to divide area occupancy which is defined as area available to a tree in the present study. In this method, stand map is covered by the mesh, and then each of intersection points is judged which of the trees the point belongs according to maximum value in the judgment factors. Where L_{ij} is distance from point i to tree j and D_j is d.b.h. of tree j . (Polygon drawn by a dotted line shows Brown's APA)

D_j/L_{ij} を判定因子として定められる占有面積は、それぞれの立木について、角度加算法によるランク1を示す範囲を画定したものとなる。また、その逆数 $1/S_j$ は、単位面積当りの立木本数を示し、立木の点密度を表わすものとなる。

(2) 立木間の競争と占有面積

§1-3で概念的に提示した最大有効空間の水平投影面積は、立木の潜在的な占有面積と考えることができる。その意味でこれを有効占有面積と呼び S_0 で表わすことにする。 S_0 は疎開木の占める占有面積に外ならない。よって、§2-3の仮想林分における閉鎖開始時のうっ閉比 $C_0 = 10.636$

を用い、有効占有面積が立木を中心とする同心円の範囲を占めるものとすれば、その半径 R_o は、(2.23)、(2.26)式から

$$R_o = \frac{1}{2} \left(\frac{W_o}{0.636} \right) = \frac{1}{2} H^{1.066} \quad \dots (2.75)$$

となる。この半径 R_o は、樹高 H の立木の潜在的な影響範囲を示しており、OPIE⁷⁴⁾(1968)の最大影響圏やBELLA⁵⁾(1971)の競争半径と概念的に共通するものであり、ここでは R_o を有効占有半径と呼ぶことにする。

(2.75)式、立木の有効占有半径が立木の生育段階の進むにつれて大きくなることを示し、隣近木と有効占有面積が重複するに至って閉鎖状態に達することになる。この場合、任意の i 地点が j 立木の有効占有面積内に位置するとき

$$R_{oj}/L_{ij} \geq 1$$

である。また、2本以上の立木の有効占有面積内に位置している場合は、占有面積の定義によって、最大の R_{oj}/L_{ij} を示す立木にその地点が占有されるものと判定される。図-2.33は3本の立木がそれぞれ有効占有面積を重複している場合に、 R_{oj}/L_{ij} を判定因子とするメッシュ法によって占有面積を画定した例である。

上のように、立木の有効占有半径に比例するとして定められた占有面積は、立木の生育段階に応じて相対的に同等の生育空間を与えたものになる。この結果は、後で明らかにするように立木間の優劣のいかに問わず、立木は同じ閉鎖度を有することになり、立木間の競争関係が考慮されないことになる。何んらかの原因によって隣接木との間に生じた生長の優劣は、両者の受光量の差となり、その結果、優勢木は一層樹冠を発達させ、隣接の劣勢木の樹冠の発達を防げる。このような隣り合、個体間にみられる生育空間の拡張関係は、般に個体間の競争関係と理解されている現象である。このような競争関係を占有面積に導入するため、判定因子に重みを付して

$$(R_{oj}/L_{ij}) \cdot CF$$

とする必要がある。ここで CF は重みを表わし、その性質から競争因子と呼ぶことにする。 CF は、一般に光に鋭敏に反応する陽樹では大きく、逆の陰樹では小さい値をとるものと考えられる。

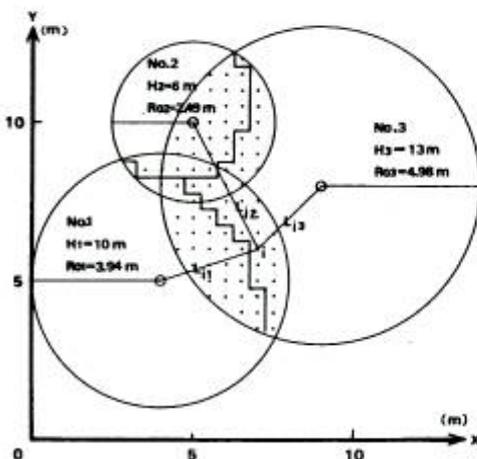


図-2.33 メッシュ法 (R_{oj}/L_{ij}) による占有面積の区画

Fig.2.33 Area occupancy divided by the mesh method using judgment factor in R_{oj}/L_{ij} . Where R_{oj} is defined as radius available to a tree in terms of area occupied by an open-grown tree.

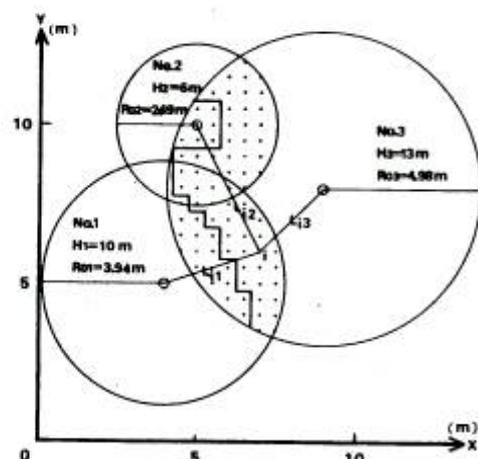


図-2.34 メッシュ法 ($H_j R_{oj}/L_{ij}$) による占有面積の区画

Fig.2.34 Area occupancy divided by the mesh method using judgment factor in $H_j R_{oj}/L_{ij}$ on the same stand map as Fig.2.33. Where H_j represents height of tree j , and then it plays a weighting role in the intensity of competition among trees.

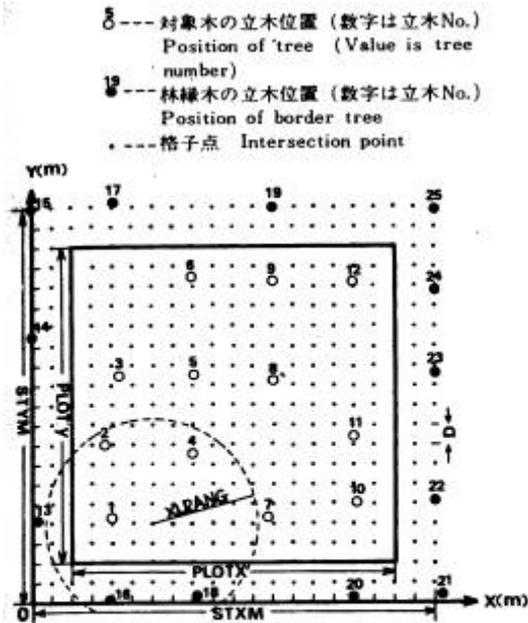


図-2.35 GROWING SPACE AREA の立木位置因子データのとり方
 Fig. 2.35 Definition of input data needed for GROWING SPACE AREA (name of computer program to evaluate area occupancy).

CF を理論的に定めることは困難であるが、立木の受光量に差をもたらす直接の因子である樹高に関連した値をとることが妥当であろう。ここでは、もっとも単純に

$$CF_j = H_j \quad \dots (2.76)$$

を採用する。この重みの適否は、次項で検討を加えるが、最終的には林分生長のシミュレーションの段階で帰納的に確かめられることになる。CF の導入によって地点の占有木の判定因子は

$$SF_{ij} = (R_{0j}/L_{ij})H_j = H_j^{1.0001}/2L_{ij} \quad \dots (2.77)$$

ここで、 SF_{ij} は i 地点における j 立木の判定因子となり、最大の SF_{ij} を示す立木が i 地点を占有するものと判定される。図-2.23 と同じ立木配置に対して(2.77)式の SF_{ij} によって画定した場合の例を図-2.34 に掲げた。

(3) 現実林分への適用例

ここでは、メッシュ法を実際の林分に適用し占有面積を画定した例を示す。対象林分は北海道栗山町に所在し、ほぼ平坦地上に生育している 21 年生の無間伐のカラマツ人工林である。調査時(1975 年)における立木本数は、2,495 本/ha であったが、立木間隔から植栽本数は約 3,000 本/

ha と推定されるので、自然枯死木の発生によって約 500 本/ha の本数減少を経てきた林分である。林分内にはほぼ方形のプロットを設定し、立木の位置、胸高直径、力枝高、4 方向の樹冠半径をそれぞれ測定した。以上の諸因子の測定値を電子計算機に入力し、電子計算機内でプロットを 0.5m のメッシュでカバーし、格子点ごとに(2.77)式の SF_{ij} によって占有木の判定を行わせた。なお、図-2.35 に示したように、林縁効果を除くため、プロットの 4 辺に沿う外側 1 列の立木は、占有面積の求積の対象外とした。

以上の処理は、図-2.36 に示した手順からなるコンピューター・プログラム(GROWINGSPACEAREA)を組み、これによって実行させた。この結果は、表-2.5 に掲げたように STANDTABLE として印刷される。TABLE の上段 3 行には年齢、プロット面積(林縁木を除く)、占有比(占有面積の合計/有効占有面積の合計)、ha 当り立木本数および立木幹材積がそれぞれ印刷されている。また 6 行目以下には、左から順に立木番号(No.)、立木位置(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))、力枝高(B(H))、樹冠長(L(H))、樹冠長比(R(H))、および閉鎖度(P(H))の各因子の測定値および計算値が打ち出されている。また、立木位置図上に占有面積の区画を記入する必要があるときには、表-2.6 に示したように、格子点の座標番号ごとに、占有木の番号を打ち出させることができる。また、立木の位置と格子点の座標原点とは一致させてあるので、立木位置図上にそれぞれの格子点を占有する立木番号を容易に記入することができる。

図-2.37 は、以上の結果にしたがって作図したプロット林分の立木位置図である。また、この図上に単木ごとに測定した 4 方向の樹冠半径によって樹冠投影図を記入した。この図上で直観されるように、ここで定めた占有面積と樹冠投影面積とは近似的ではあるが、相似関係にあることが認められる。両者の面積の大きさを図-2.38 によって対応してみると、かなり明確に比例関係(相関係数 0.94)を示すことが確認される。

樹冠の拡張は、立木の空間利用の具体的な形態を示すものである。したがって、立木が優占的に利用できる平面

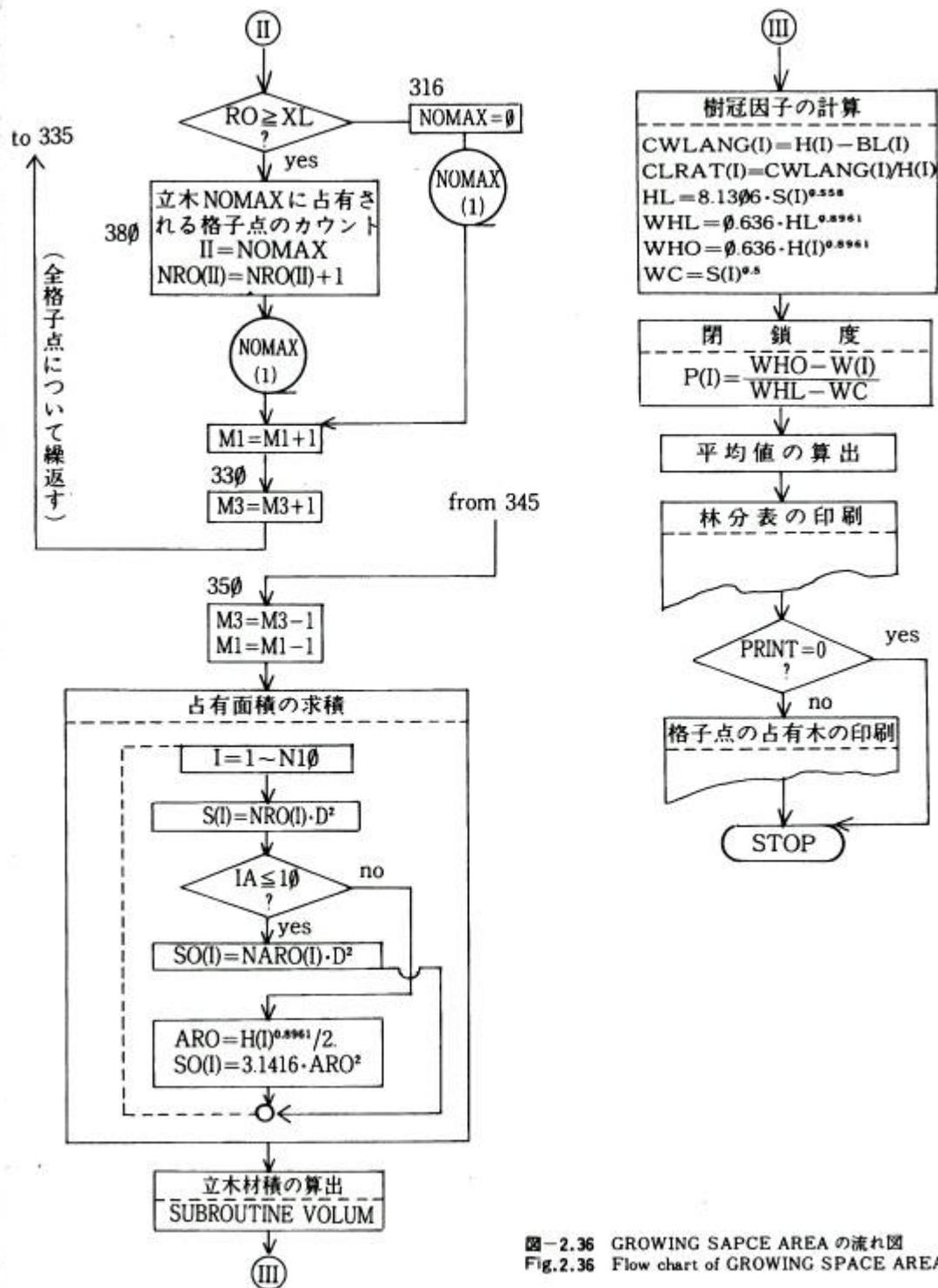


図-2.36 GROWING SPACE AREA の流れ図
Fig.2.36 Flow chart of GROWING SPACE AREA

Table 25 STAND TABLE

AGE= 21YEARS
 PLOT AREA= .0232(M**2)
 SPACE RATIO (S/SO)= .06 NUMBER OF TREE/HA=2495. VOLUM/HA= 194.9055(M**3)

NO. (I)	X(I) (M)	Y(I) (M)	H(I) (M)	DBH(I) (CM)	VOL(I) (M**3)	S(I) (M**2)	SO(I) (M**2)	B(H) (M)	L(H) (M)	R(H)	P(H)
1	3.30	2.40	12.00	11.70	.0653	3.25	67.48	8.90	3.10	.258	.7015
2	5.50	2.50	10.90	12.20	.0648	2.75	56.80	8.30	2.60	.239	.7079
3	7.40	2.70	12.50	14.80	.1068	5.00	72.61	8.70	3.80	.304	.5259
4	11.80	3.10	9.20	8.10	.0254	2.00	41.92	7.30	1.90	.207	.7042
5	14.80	3.40	13.50	16.80	.1468	7.50	83.34	8.60	4.90	.363	.5769
6	16.20	3.20	10.50	8.00	.0280	1.75	53.12	8.20	2.30	.219	.9644
7	17.40	3.40	13.00	12.30	.0775	3.50	77.89	9.50	3.50	.269	.7231
8	3.10	4.00	11.00	11.60	.0593	3.00	57.74	8.90	2.10	.191	.7041
9	5.40	4.30	10.50	11.00	.0513	4.25	53.12	8.00	2.50	.238	.5113
10	8.90	4.60	14.00	16.00	.1381	6.50	88.96	8.10	5.90	.421	.5225
11	10.30	4.70	14.00	14.30	.1111	6.25	88.96	8.50	5.50	.393	.5657
12	13.10	5.60	12.50	12.50	.0771	6.25	72.61	8.00	4.50	.360	.4450
13	14.70	5.60	9.00	7.50	.0215	1.50	40.30	7.50	1.50	.167	.8931
14	17.40	5.40	12.00	13.60	.0873	3.25	67.48	8.40	3.60	.300	.6839
15	3.30	5.90	13.00	13.70	.0954	6.50	77.89	8.70	4.30	.331	.4511
16	5.40	5.80	9.50	9.00	.0320	1.50	44.40	7.70	1.80	.189	.9257
17	7.30	6.00	9.40	8.60	.0290	2.00	43.56	7.50	1.90	.202	.6886
18	8.80	6.30	11.80	12.00	.0675	3.75	65.48	9.00	2.80	.237	.6648
19	10.50	6.50	10.00	9.00	.0335	2.50	48.67	8.50	1.50	.150	.7300
20	13.10	7.40	11.70	12.40	.0714	4.00	64.49	7.60	4.10	.350	.6019
21	16.20	6.90	13.00	13.30	.0901	5.00	77.89	10.00	3.00	.231	.6134
22	17.40	7.20	9.60	6.30	.0164	1.25	45.24	8.10	1.50	.156	1.0381
23	5.40	7.40	11.90	13.00	.0794	4.75	66.48	7.70	4.20	.353	.5361
24	7.20	7.80	8.00	4.80	.0084	1.00	32.63	6.80	1.20	.150	.9620
25	10.30	8.30	12.50	13.90	.0946	5.00	72.61	9.20	3.30	.264	.5542
26	13.10	8.60	11.00	11.80	.0613	2.75	57.74	8.00	3.00	.273	.7049
27	16.20	8.70	13.50	16.40	.1400	5.25	83.34	9.80	3.70	.274	.6066
28	17.40	8.70	10.60	13.10	.0725	3.25	54.03	8.40	2.20	.208	.6347
29	3.40	9.00	12.50	13.00	.0831	4.25	72.61	9.30	3.20	.256	.6011
30	5.30	9.00	13.00	12.40	.0787	3.00	77.89	9.50	3.50	.269	.8102
31	7.20	9.10	14.00	13.70	.1022	5.00	88.96	9.50	4.50	.321	.6608
32	8.70	9.50	13.00	11.80	.0715	3.75	77.89	9.20	3.80	.292	.6658
33	11.70	9.80	11.00	9.00	.0365	4.25	57.74	9.20	1.80	.164	.5977
34	14.60	10.40	13.00	15.70	.1242	6.25	77.89	9.00	4.00	.308	.4727
35	17.40	10.60	11.50	13.90	.0876	4.00	62.53	8.60	2.90	.252	.5499
36	3.20	10.50	9.20	9.40	.0337	1.75	41.92	7.50	1.70	.185	.8102
37	5.30	10.70	12.50	12.80	.0807	5.00	72.61	9.10	3.40	.272	.5683
38	8.60	10.90	13.00	17.30	.1500	5.00	77.89	8.90	4.10	.315	.5710
39	10.10	11.50	9.50	9.50	.0354	2.25	44.40	7.50	2.00	.211	.7136
40	13.00	11.90	12.50	14.60	.1040	5.00	72.61	8.70	3.80	.304	.5174
41	3.20	12.20	11.80	14.20	.0935	3.50	65.48	8.50	3.30	.280	.6001
42	5.30	12.40	11.50	9.50	.0421	2.00	62.53	9.00	2.50	.217	.9344
43	7.20	12.60	12.00	13.80	.0898	4.00	67.48	8.70	3.30	.275	.6228
44	11.60	13.50	13.00	13.00	.0862	5.50	77.89	8.90	4.10	.315	.5309
45	13.00	13.50	10.50	10.00	.0428	2.25	53.12	7.50	3.00	.286	.7661
46	14.50	13.50	11.00	11.00	.0536	3.00	57.74	8.00	3.00	.273	.6566
47	16.00	13.00	12.00	11.80	.0664	4.75	67.48	8.20	3.80	.317	.5425
48	5.30	14.00	15.00	17.00	.1658	7.00	100.67	9.00	6.00	.400	.5551
49	7.10	14.30	13.50	12.30	.0803	4.50	83.34	8.30	5.20	.385	.6553
50	10.20	14.80	15.00	19.40	.2144	12.00	100.67	8.40	6.60	.440	.3088
51	16.10	14.90	12.00	12.00	.0686	4.50	67.48	8.00	4.00	.333	.5663
52	3.00	15.60	10.50	10.80	.0496	4.50	53.12	6.90	3.60	.343	.4522
53	5.30	16.00	13.00	13.70	.0954	3.75	77.89	10.00	3.00	.231	.7312
54	7.20	16.20	12.50	15.60	.1183	4.25	72.61	8.00	4.50	.360	.6011
55	13.00	17.00	14.00	13.40	.0979	7.25	88.96	8.70	5.30	.379	.5065
56	14.50	17.40	14.50	15.00	.1259	5.50	94.73	8.50	6.00	.414	.6377
57	16.10	16.70	10.50	9.50	.0388	1.75	53.12	8.50	2.00	.190	.9022
58	17.40	16.30	13.00	11.00	.0625	2.50	77.89	10.50	2.50	.192	.9356
AVERAGE			11.90	12.31	.0781	4.09	67.31		3.39	.285	.6549

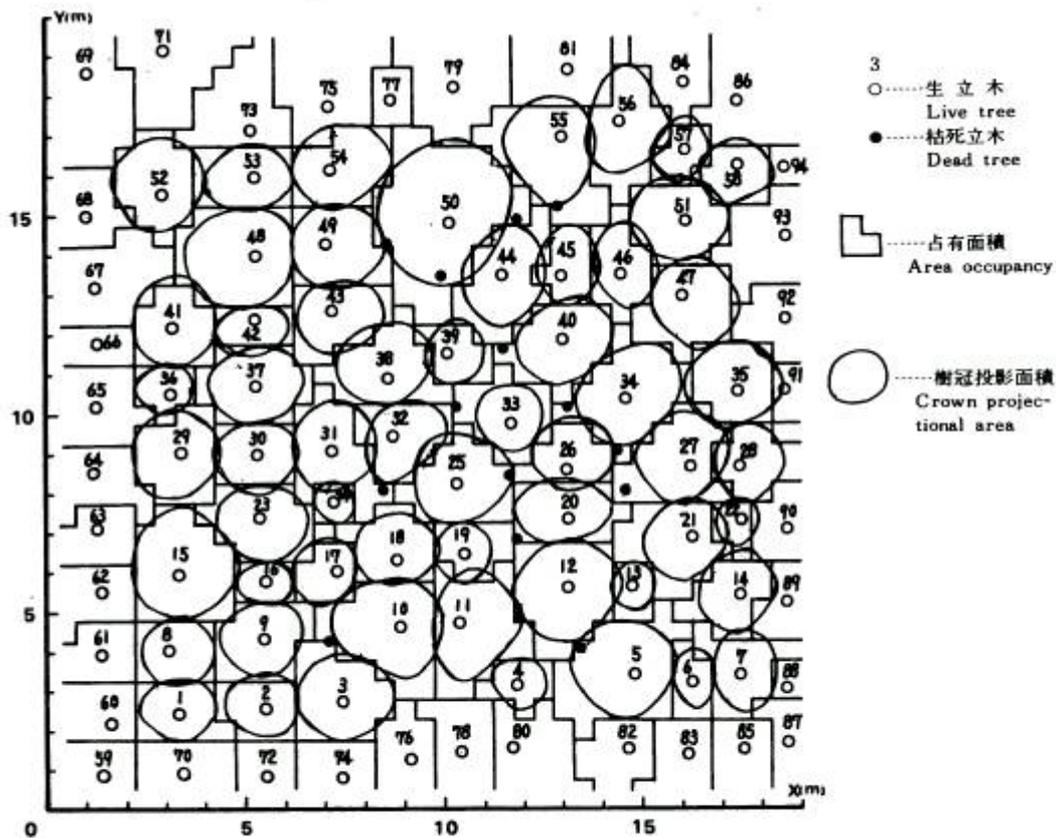


図-2.37 プロット林分内の単木ごとの占有面積と樹冠投影面積
 Fig.2.37 Area occupancy and crown projection area in plot of the actual unthinned stand of *L. leptolepis* at 21-years old.

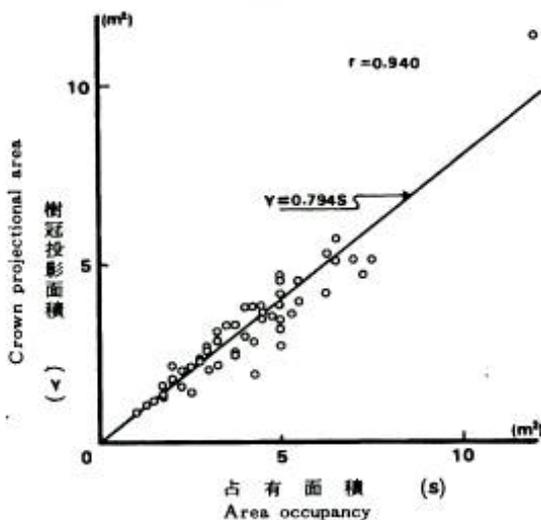


図-2.38 プロット林分の各立木の占有面積と樹冠投影面積の関係
 Fig.2.38 Relationships between area occupancy and crown projection area in the plot

。範囲と規定して求めた占有面積は、その立木の樹冠投影面積に対して比例的な関係を示すものでなければならない。上の適用例では、ほぼこの条件が満たされており、ここで提示した占有面積の画定法の妥当性を認めることができよう。

占有面積の逆数を 10,000 倍した値は、ha 当り立木本数を与え、占有面積の当量本数密度を示すことになる。林分内のいずれの地点も、いずれかの立木の占有面積内に含まれる完全閉鎖林分では、全立木の平均占有面積の当量本数密度は、その林分の ha 当り立木本数と一致する。プロット林分の平均占有面積は 4.09 m²であり、その当量本数密度は 2,445 本/ha となる。また、占有面積の最大値は 12.00

m², 最小値は 1.00 m²を示し, 各立木の当量本数密度は 833~10,000 本/ha の広い範囲に及んでいる。

一般に一斉人工林では, 幼齢期において立木の大きさ, その配置状態とも比較的斉一であるが, 生長にともなうて次第に立木間に個体差を生じ, また, 枯損の発生などのために立木の配置も不規則化の方向をたどる。この結果, 立木の確保できる生育空間も不平等となり, 優勢木は一層その占有面積を拡大し, 相対的に劣勢木は, その占有面積の縮小を強いられることになる。占有面積をその当量本数密度に置き換えて考えれば, 現実林分における単木の占有面積の推移を, 当量本数密度に相当する単位面積当たり立木本数からなる前 2 節の仮想林分の閉鎖過程に対応させることができる。すなわち, 占有面積の拡大は, 立木本数の減少過程であり, 逆に占有面積の縮小は, 立木本数の

Table 2.6 TREE NUMBER ON MESH POINT

ROW	CLOUM	TREE NO.
0	0	59
0	1	59
0	2	59
0	3	59
0	4	59
0	5	70
0	6	70
0	7	70
0	8	70
0	9	70
0	10	72
0	11	72
0	12	72
0	13	74
0	14	74
0	15	74
0	16	74
0	17	74
0	18	76
0	19	76
0	20	78
0	21	78
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
31	0	68
31	1	68
31	2	68
31	3	68
31	4	52
31	5	52
31	6	52
31	7	52
31	8	53
31	9	53
31	10	53
31	11	53
31	12	53
31	13	54
31	14	54
31	15	54
31	16	54
31	17	50
31	18	50
31	19	50
31	20	50
.	.	.
.	.	.
.	.	.

増加過程として表わされ, 仮想林分で導いた立木の樹高対直径の相対生長モデルを, そのまま単木の占有面積を介してそれぞれに適用することができる。

プロット林分の樹高の範囲は, 8.0m から 16.0m に及び, すでに被圧による枯死木も発生しており, 成林以来それぞれの文木が, 上述したような占有面積の拡大, 縮小の過程を経てきたものである。この林分中の枯損木の生じていない 1 列にトランクセクトをとり, この面の樹冠断面を図-2.39 に示した。閉鎖木の樹冠は, 方向によって不規則に発達しており, その力枝も疎開木のように明瞭な形態を呈していない。プロット林分については, 藤森¹⁴⁾(1975)による力枝の定義を参考にして, 最大の樹冠半径を形成している枝のうち若葉且の多いものを選んで力枝と判定した。その地上高を測竿を用いて測定し力枝高とした。とくにトランセクトの立木については, 4 方向別に力枝を判定し, その地上高を平均して力枝高とした。図-2.39 にみられるように, 力枝高のラインは樹高の高低にほぼ平行しており,

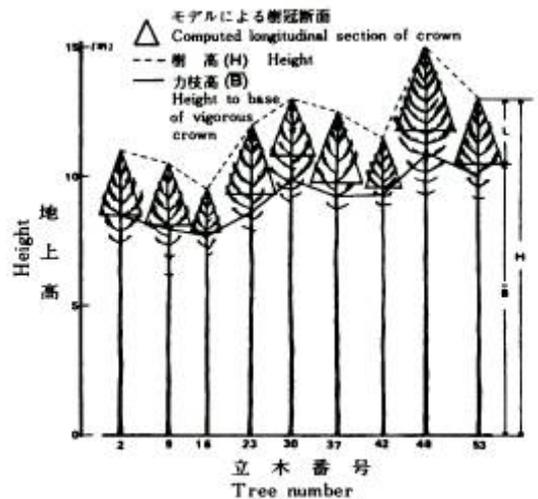


図-2.39 プロット林分の樹冠層断面
Fig.2.39 A longitudinal section of canopy in the plot

表- 2.7 樹冠因子の実測値とモデルによる値との比較

Table 2.7 Comparison of actual values with crown sizes calculated by the models.

立 番 木 号 Tree No.	樹 高 Height (m)	占 面 積 Area occupancy (m ²)	閉 鎖 限 高 Height at closing limit (m)	実 測 値 Actual crown sizes				モ デ ル Models			
				平 均 樹 冠 長 Crown length (m)	樹 冠 幅 Crown width (m)	う っ 閉 比 Ratio of crown closure	樹 冠 長 比 Ratio of crown length	樹 冠 長 Crown length (m)	樹 冠 幅 Crown width (m)	う っ 閉 比 Ratio of crown closure	樹 冠 長 比 Ratio of crown length
2	10.9	2.75	14.30	2.52	1.70	1.02	0.23	2.04	1.50	0.90	0.19
9	10.5	4.25	18.23	2.48	1.90	0.92	0.24	2.35	1.70	0.84	0.22
16	9.5	1.50	10.19	1.81	1.20	0.98	0.19	1.57	1.19	0.97	0.17
23	11.9	4.75	19.40	3.42	2.16	0.99	0.29	2.55	1.83	0.84	0.21
30	13.0	3.00	15.01	3.06	1.90	1.12	0.24	2.24	1.63	0.94	0.17
37	12.5	5.00	19.96	3.32	2.10	0.94	0.27	2.65	1.89	0.85	0.21
42	11.5	2.00	11.97	2.17	1.50	1.06	0.19	1.87	1.39	0.98	0.16
48	15.0	7.00	24.08	4.10	2.56	0.97	0.27	3.19	2.24	0.84	0.21
53	13.0	3.75	17.00	3.03	1.86	0.96	0.23	2.43	1.75	0.90	0.19

* 4方向の平均値

表- 2.8 プロット林分内の被圧木の樹冠因子と最近5年間の胸高直径生長量

Table 2.8 Crown sizes and diameter increment for the latest 5-year period of the suppressed trees in the plot.

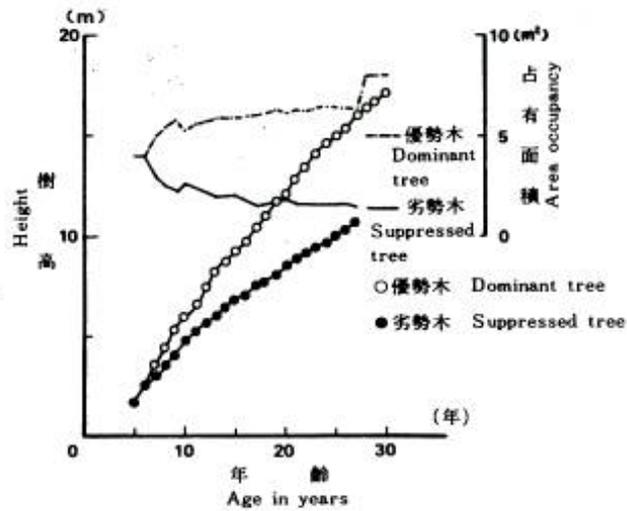
立 番 木 号 Tree No.	樹 高 Height (m)	胸 直 径 D. b. h. (cm)	樹 冠 幅 Crown width (m)	平 均 樹 冠 長 Mean crown length (m)	樹 冠 長 比 Ratio of crown length	最 近 5 年 間 胸 高 直 径 生 長 量 Diameter increment for the latest 5-year period (mm)	閉 鎖 限 高 Height at closing limit (m)	閉 鎖 度 Closing grade
6	10.5	8.0	1.20	1.90	0.18	2.0	11.11	0.964
13	9.0	7.5	1.10	1.50	0.17	3.0	10.19	0.893
16	9.5	9.0	1.20	1.81	0.19	2.5	10.19	0.926
22	9.6	6.3	1.16	1.50	0.16	2.0	9.21	1.038
24	8.0	4.8	1.05	1.20	0.15	1.0	8.13	0.962
57	10.5	9.5	1.46	1.70	0.16	3.5	11.11	0.902

このラインから上方の樹冠層は、十分な太陽光を受けて呼吸量を上回る同化作用が営まれている葉層(藤森¹⁴⁾1975)である。この樹冠層は、いわば林分の生産的空間層であり、前2節での仮想林分における立木の樹冠長部分に相当するものである。

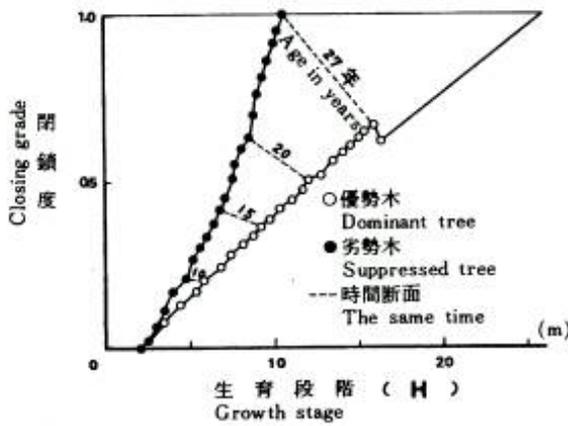
仮想林分では、樹冠長と樹冠幅との間に疎開木と同等の相対生長関係が成立していることを前提に、与えられた占有面積のもとで拡張できる樹冠幅をうっ閉比によって定めた。トランセクトの各立木について、それぞれの占有面積が一定で推移してきたものとし、また、占有面積を方形で近似し、仮想林分と同様な樹冠の閉鎖モデルによって求めた樹冠縦断面要素の値を表- 2.7 に掲げた。また、これらの数値によって図- 3.39 上にそれぞれの樹冠縦断面を記入した。

モデルによる樹冠縦断面を実測値と比較してみると、閉鎖限時まで十分な余裕を残している優勢木ほど過少な傾向が認められる。これは、閉鎖モデルで閉鎖開始時から限界時に至るまで樹冠幅が、直線的に拡張するとの仮定をとっているからである。この点にやや不満は残るが、仮想林分を使って組み立てられた閉鎖モデルは現実林分における樹冠の枯れ上がり現象を十分に説明しうるものと認められよう。

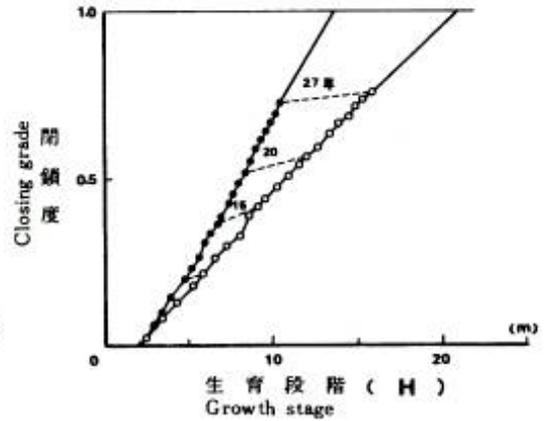
§ 2-3 において閉鎖木の枯死条件として、立木の物質経済の面から樹冠長比を採用した。筆者はいままで、過密なカラマツ人工林で多くの枯死木を観察してきたが、この経験によれば、被圧を受けて枯死寸前の状態の立木は、樹冠長比が低下し、同時に着葉密度も低くなり遂に枯死に至るという経過が一般的な枯死過程である。こうした観点から、プロット内の立木に観察を加えた結果、表- 2,8 に掲上した 6 本の被圧木が近い将来に枯死するものと



a. 樹高生長と占有面積の推移
a. Transition of height growth and area occupancy



b. 閉鎖度の推移
b. Transition of the closing grade with advancing growth stage, based on area occupancy using judgment factor in $H_j R_{0j} / L_{ij}$.



c. 判定因子 R_{0j} / L_{ij} によった場合の閉鎖度の推移
c. Transition of the closing grade with advancing growth stage, based on area occupancy using R_{0j} / L_{ij} .

図-2.40 相隣接する優勢木と劣勢木の閉鎖モデル

Fig.2.40 Competition model between two neighboring trees, dominant tree and suppressed tree.

判断された。これら 6 本の被圧木についての樹冠因子および最近 5 年間の直径生長量の測定値を表-2.8 に示した。いずれの被圧木もその樹冠長比は 0.2 以下に低下している。とくに No.22 以下の 3 本の被圧木は、着葉密度が極端に低く、明らかに枯死寸前の状態に達している。このような測定結果は、筆者の他の過密林分での観察結果ともよく一致する。また、最近の直径生長量からみても、樹冠長比が 0.2 以下になると、ほとんど肥大生長を停止し、さらに 0.16 前後に低下すると、その立木は枯死もしくは枯死状態に至るものと判断される。

(4) 考察

閉鎖した林分で、各立木が優占的に利用している面積範囲をそれぞれの単木の占有面積の定義域とした。立木間の樹冠拡張競争を考慮して、その定義域を画定する方法を提示した。一方、立木の大きさ、位置ともに斉一な仮想林分における単木当り林地面積は、上の定義の占有面積にそのまま読み換えることができる。したがって、仮想林分

の閉鎖モデルは、そのまま現実林分の単木の閉鎖モデルとして適用することができる。このような観点から十分に閉鎖の進んでいる現実林分の立木の樹冠縦断面と仮想林分で導いた閉鎖モデルによる樹冠縦断面を対比した結果、ほぼ両者は一致し、閉鎖モデルを占有面積を介して単木の閉鎖過程に適用しうることを確かめることができた。

一斉人工林において、何んらかの原因によって生ずる生長の個体差は、立木間の生育空間の拡張競争の切っ掛けとなり、林分の生育段階の進むにつれて、一層その立木間の優劣差は拡大する。このような過程を占有面積によってみれば、優勢木はその占有面積を拡張し、劣勢木は逆に縮小する過程として表わされる。図-2.40は、優勢木と劣勢木が相隣接している場合を想定し、それぞれの占有面積の推移と、それにとまう閉鎖度の推移を示したものである。この図から明らかなように、樹高生長の優劣にしたがって、両者の占有面積は次第にその差を拡大してゆく。その結果、両者の閉鎖度に差を生じて、同一時間断面(同一年齢)において、劣勢木は優勢木よりも常に高い閉鎖度で推移する。さらに、生育段階が進めば、劣勢木は閉鎖限界に達して枯死に至る。以後、枯死木の占有面積は、優勢木に利用され閉鎖度の低下をもたらす。

上の例は、林分内の単木の閉鎖過程を占有面積を導入し閉鎖モデルによって説明したものである。このモデルの適用範囲を林分内の全立木に広げれば、現実林分の閉鎖過程のモデル化が果される。すなわち、現実の閉鎖林分は、樹高生長の優劣、立木の配置関係によって、それぞれ多様な閉鎖履歴をたどる立木の集団としてモデル化される。

以上の閉鎖モデルにおいて、占有面積の画定に競争因子を導入しなければ、図-2.40cに示したように、立木の生長の優劣にかかわらず、いずれの時間断面においても、ほぼ同等の閉鎖度を示す結果となり、被圧による枯死木の発生を説明できない。また、このような閉鎖度が一定の場合には、§2-4(3)で明らかにしたように、樹高対直径の間に劣生長を表わす allometry 式が成り立つことになる。プロット林分について、図-2.41にみられるように逆に直径の優生長を示す関係が認められ、上の等閉鎖度の成立を否定している。

図-2.41に掲げたプロット林分の樹高対直径の関係は、林分の樹高を推定するために利用される樹高曲線の変数

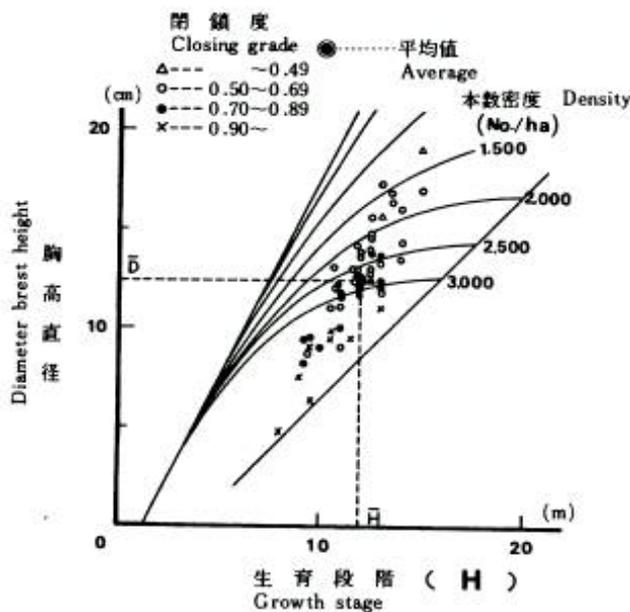


図-2.41 プロット林分の樹高対直径の相対生長関係
Fig.2.41 Allometric relations between height and diameter in the plot

を入れ替えたものであり、一斉人工林で一般的にみられる傾向にしたがっている。このような傾向は、樹高生長の優劣にとまう閉鎖度の差によってもたらされることを、図上の閉鎖度の区分からうかがうことができる。

さらに、プロット林分の平均樹高と平均直径の座標値を、無間伐の樹高対直径の相対生長モデルによる値と図-2.41で比較してみると、プロット林分の測点は、その平均占有面積の当量本数密度に相当する本数密度階(2,500本/ha)の計算値のやや下位に位置する。すでに述べたように、プロット林分は、より高い本数密度の閉鎖を経過してきている。この点を考慮すれば、§2-3(3)で考察した理由によって、樹高対直径の相対生長モデルの計算値は、プロット林分についても妥当な値を示していると認められる。

§2-6 林分樹高の生長モデル

一斉人工林で単木の占める占有面積は、それぞれの樹高の優劣によって定まることを明らかにしたが、この占有面積を求めるには、林分の生長過程における単木ごとの樹高生長を知る必要がある。樹高生長は、幹の梢端部の伸長によるものであり、端部が隣接木の樹冠によって覆われない限り、その影響を受けないものと考えられる。この現象は、林分の優勢木の樹高生長が、立木密度の影響を受けないという定説によって裏付けされている。したがって、樹高生長は直径生長と異なり、その生長差をもたらす要因を捜し出し、それとの因果関係を決定論的に求めることは難しい。そこで、ここでは、樹高生長の個体差を不確定的な個体変動として取り扱い、単木ごとの樹高生長を実現するシミュレーション・モデルを構成することにした。

(1) 樹高分布の推移

一斉人工林では、植栽時にほぼ同一規格の苗木が植え付けられるが、植付けの精粗や部分的な土壌条件の違い、または林床植生との競合、その他の原因によって単木の生長に優劣が生じる。小木³⁹⁾(1973)は、閉鎖に至るまでのカラマツ人工林の樹高を、5、7、9、12年生時に継続して毎木測定を行い、この期間の樹高分布の推移を明らかにしている。この調査結果によると、樹高分布は各調査時点を通じて正規分布型で推移し、林分の生長にともなってその幅を広げる。また、単木間の樹高順位は、大きく変化することなく初期の劣勢木は枯損するか、または被圧木となることが明らかにされている。

図-2.42に示した樹高分布の推移は、筆者ら³²⁾(1974)の調査による北海道中央部に位置する狩勝峠旧鉄道防雪林の例である。このカラマツ人工林は、1921年に約5,000本/haの密度で植栽され以後防雪効果を維持するため

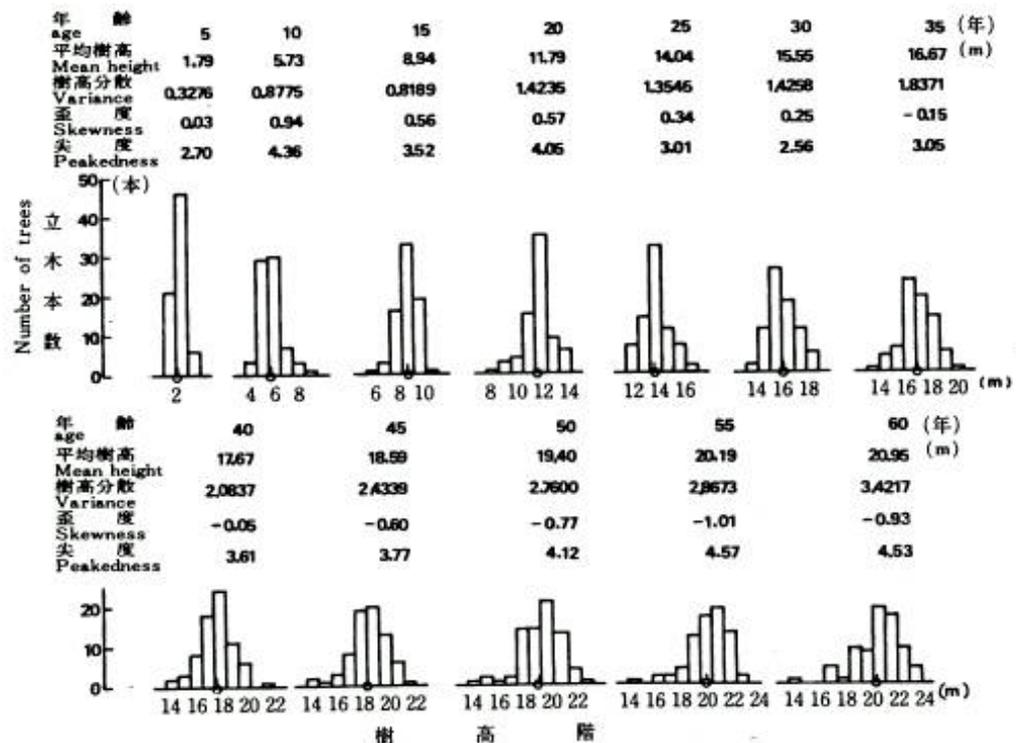


図-2.42 カラマツ人工林の樹高分布の推移
(狩勝峠旧鉄道防雪林60年生カラマツ人工林の例)

Fig. 2.42 An example of transition of the height distribution with age in plantation of *L. leptolepis*. Data were obtained from stem analysis for all trees in 0.4 hectare sample plot.

保育間伐はほとんどなされていない林分である。しかし、調査時の1972年に立木本数は558本/haまで減少しており、野鼠による食害、風倒害および雪害などを受けて本数減少を経過してきた林分と推定される。この林分中に40×40mの方形区を定め、その区内の全立木を伐倒し簡易な樹幹解析(幹の下部は4mの丸太3本を採材した元口で、それ以上の地上高は2m間隔で円板を採取して測定した)に供し、各年階の樹高を求めた。図-2.42は、この測定値によったものである。

この調査林分の樹高分布は、壮齡期まで正規分布型をとりながら、次第にその幅を広げてきている。後期に至り、一部の立木の樹高生長が衰えて、上層から下層に莖脱する傾向が現われてくる。その結果、樹高分布はゆがみを生じて、次第にすそを広げてきている。これらの劣勢木を除けば、その樹高分布は、全生育段階を通じてほぼ正規分布型を保って推移してきている。

ここで、常に十分な樹幹距離が保たれていて、立木の梢端部が、隣接木の樹冠によって被圧されず、また被害による生育阻害を受けることなく樹高生長を遂げてきた林分を考えてみる。このような理想的な林分における立木の樹高は、もっぱら林地の地位に応じた生長を遂げることになり、立木間の生長の優劣差は、個体の表現型変動によ

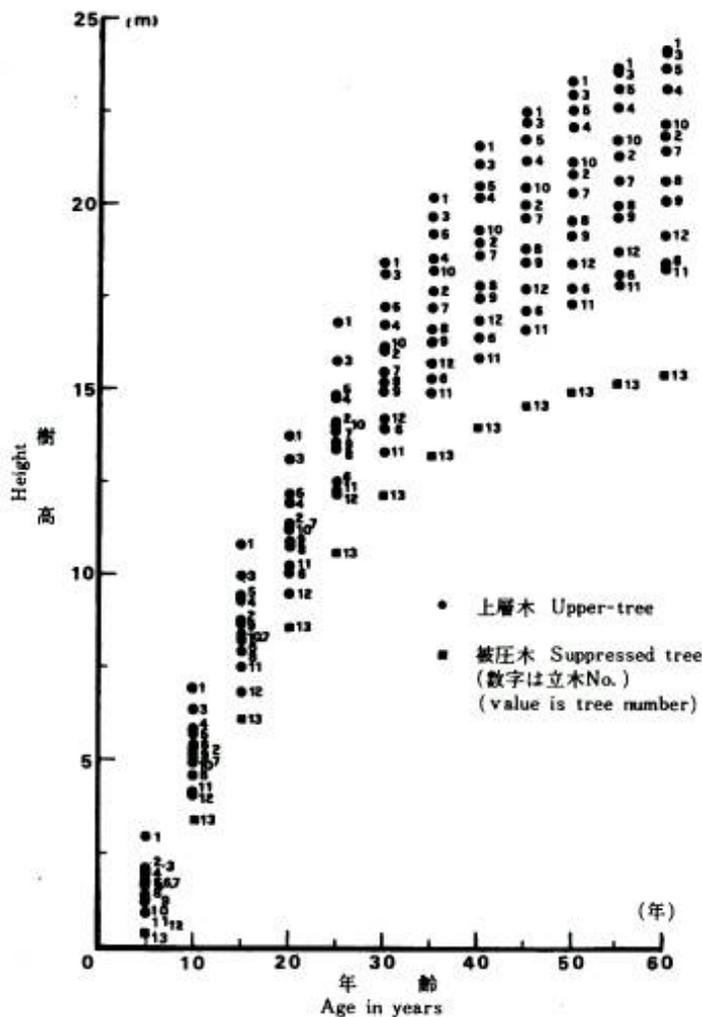


図-2.43 隣接立木群の樹高生長
Fig.2.43 Height growth of individual trees on subplot in the same sample plot as Fig.2.42.

てもたらされることになる。このような立木から成る林分の平均樹高は、その樹種に対する林地の潜在的生産力を示す値とみなされ、純粋に林地の地位を測る尺度となるべき樹高である。ここでは、上の理想的な林分を構成する立木を上層木、また、その樹高を上層木樹高と定め、その平均樹高を上層木平均樹高と呼ぶことにする。

上のような理想的な林分に対して、現実林分においては、旧鉄道防雪林の例でみられたように、生長の過程で、逐次被圧または被害による生長阻害を受ける立木が発生し、これらの立木は次第に上層群から莖脱し下層木となる。この結果、林分の生長にともなって樹高分布の幅が拡大してゆくものと考えられる。このような現実林分の樹高生長過程をモデル化するには、第1段階で、林分樹高の内因的な生長法則ともいうべき上層木の樹高生長をモデル化し、次の段階で、被圧または被害などの外因作用による下層木の発生機構を組み込んでゆくという手順が現実現象に適した方法であろう。以上のような観点から、まずここでは、上層木を対象にして、その樹高生長のモデル化

を図ることとした。

上記した旧鉄道防雪林の伐倒区と同じ林分内楓衝や冠雪などによる被害を受けた形跡の認められない 13 本の隣接木群を選んで、これらを伐倒して樹幹解析を行った。この樹幹解析によって求めた立木群の樹高生長の推移を図-2.43 に示した。この図で認められるように、No.1 の立木は各年階を通じて、常に最大の樹高を保ち続ける。これとは逆に No.13 の立木は、初期から劣勢で次第にその傾向を強め、後半期に至って急激に生長が衰えて他の立木群から雑説している。この立木の梢端部は、調査時点においては隣接木の樹冠に覆われており、完全な被圧状態にあった。その他の 11 本の立木は、生長の途中で樹高の順位が入れ替りながら次第に樹高に優劣差を生じてきている。

また、これら 13 本の立木の連年樹高生長量を

$$\frac{\Delta H_{it} - \Delta \bar{H}'_t}{\sigma_{\Delta H'_t}}, \quad (i = 1, 2, \dots, 12, t = 5, 6, \dots, 60)$$

ここで、 ΔH_{it} は No.i 立木の t 年における連年樹高生長量、 $\Delta \bar{H}'_t$ は No.13 立木を除く立木群の t 年における連年樹高生長量の平均値、 $\sigma_{\Delta H'_t}$ は同じく t 年における連年樹高生長量の標準偏差

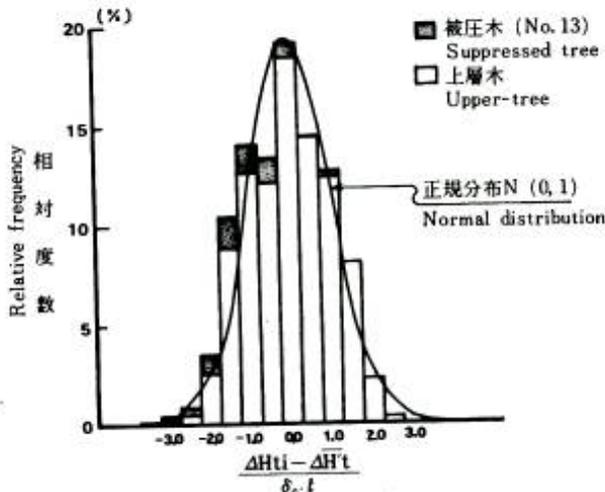


図-2.44 隣接立木群の連年樹高生長量の度数分布
Fig.2.44 Distribution of current annual height increment of the trees on the subplot

によって標準化し、その度数分布を図-2.44 に示した。劣勢な No.13 立木は分布の左側に偏よるが、その他の立木は標準偏差の 2.5 倍の範囲内に分布し、ほぼ正規分布型をなしている。

以上のような樹高生長の経過からみて、No.13 以外の立木は、生長阻害を受けることなく樹高生長を遂げてきた立木と判断される。すなわち、12 本の立木群は、前で規定した上層木樹高の条件をほぼ満足するものとみることができる。筆者³⁰⁾(1968)は以前に、ある年齢の立木の樹高は、それまでの連年樹高生長量の累積和であるという点に着目し、トドマツ人工林の樹高分布の推移に分析を加えた。ここでも同様な視点から、上で選んだ上層木の樹高分布の推移に検討を加えてみる。

いま、n年生に達した上層木平均樹高を \bar{H}'_n とすると、

$$\bar{H}'_n = \bar{H}_0 + \sum_{t=1}^n \Delta \bar{H}'_t \quad \dots (2.78)$$

ここで、tは年齢、 \bar{H}_0 は植栽時の平均樹高、 $\Delta \bar{H}'_t$ はt年における上層木樹高の平均連年生長量で示される。すなわち、n年生の林分の樹高は、それまでの連年樹高生長量の和である。ここで、各年齢の連年樹高生長量を確率変数とみなせば、n年生の林分の上層木樹高の分散は、

$$\begin{aligned} \sigma_{\bar{H}'_n}^2 &= \sigma_{\bar{H}_0}^2 + \sigma_{\Delta H'_1}^2 + \dots + \sigma_{\Delta H'_n}^2 + 2(\sigma_{\bar{H}_0} \sigma_{\Delta H'_1} \rho_{\bar{H}_0 \Delta H'_1} + \sigma_{\bar{H}_0} \sigma_{\Delta H'_2} \rho_{\bar{H}_0 \Delta H'_2} \\ &\quad + \dots + \sigma_{\Delta H'_{n-1}} \sigma_{\Delta H'_n} \rho_{\Delta H'_{n-1} \Delta H'_n}) \\ &= |\sigma_{\bar{H}_0}^2 + \sigma_{\Delta H'_1}^2 + \dots + \sigma_{\Delta H'_{n-1}}^2 + 2(\sigma_{\bar{H}_0} \sigma_{\Delta H'_1} \rho_{\bar{H}_0 \Delta H'_1} + \sigma_{\bar{H}_0} \sigma_{\Delta H'_2} \rho_{\bar{H}_0 \Delta H'_2} \\ &\quad + \dots + \sigma_{\Delta H'_{n-1}} \sigma_{\Delta H'_n} \rho_{\Delta H'_{n-1} \Delta H'_n})| + |\sigma_{\Delta H'_n}^2 + 2(\sigma_{\bar{H}_0} \sigma_{\Delta H'_n} \rho_{\bar{H}_0 \Delta H'_n} \\ &\quad + \sigma_{\Delta H'_1} \sigma_{\Delta H'_2} \rho_{\Delta H'_1 \Delta H'_2} + \dots + \sigma_{\Delta H'_{n-1}} \sigma_{\Delta H'_n} \rho_{\Delta H'_{n-1} \Delta H'_n})| \\ &= \sigma_{\bar{H}_0}^2 + \sigma_{\Delta H'_n}^2 + 2(\sigma_{\bar{H}_0} \sigma_{\Delta H'_n} \rho_{\bar{H}_0 \Delta H'_n}) \quad \dots (2.79) \end{aligned}$$

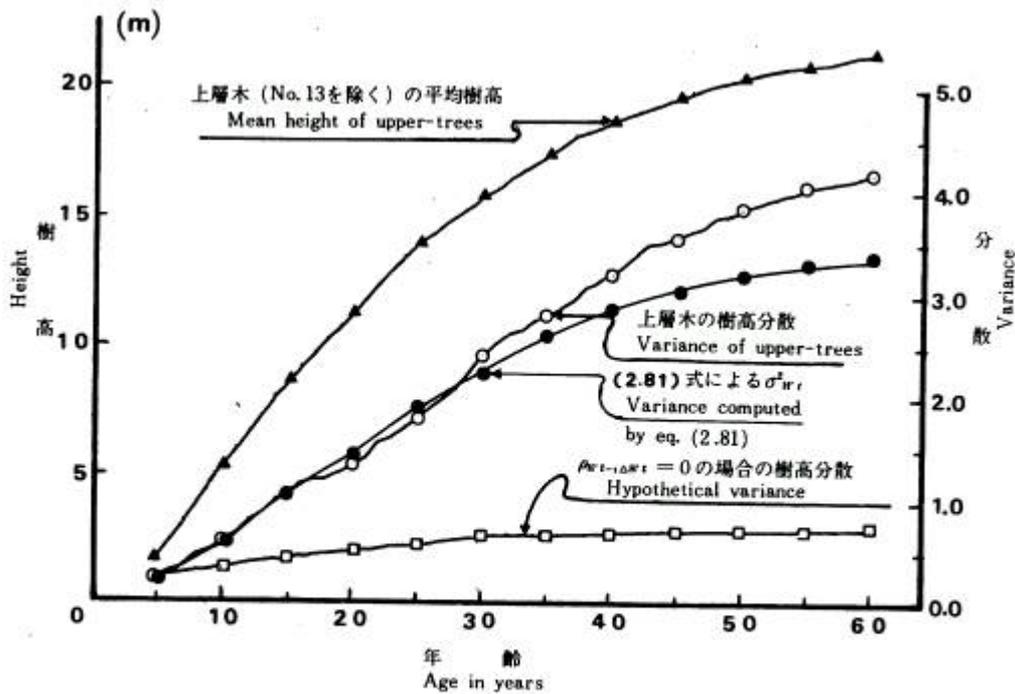


図-2.45 上層木の樹高生長と樹高分散の推移
 Fig.2.45 Transition of height growth and variance of the upper-trees on the subplot.

ここで、 $\sigma_{H't}^2$ 、 $\sigma_{\Delta H't}^2$ はそれぞれ t 年における総樹高および連年樹高生長量の分散、 $\rho_{H't-1\Delta H't}$ は $t-1$ 年(期首)の総樹高と t 年の連年樹高生長量との相関係数
 で与えられる。(2.79)式で明らかなように、各年齢における連年樹高生長量がそれぞれの年齢間に独立であれば、 n 年における樹高分散は、 n 年までの連年樹高生長量の分散の和となる。また、非独立であれば、最後の式から期首の樹高と、その期間の連年樹高生長量との相関性に起因する項が加わる。

上で選定した上層木群の樹高分散は、図-2.45 に示したように推移する。同じ図上に、各年齢間の連年樹高生長量が相互に独立と仮定した場合の樹高分散を求めその推移を記入した。明らかに実際の樹高分散は、この仮定した

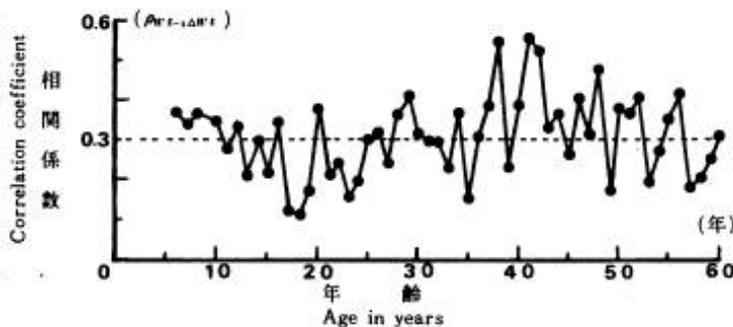


図-2.46 上層木の期首の樹高と連年樹高生長量との相関係数の推移
 Fig.2.46 Transition of the correlation coefficient between heights of the upper-tree at the beginning of annual period ($H't-1$) and these annual increments ($\Delta H't$) on the subplot.

分散よりも大きく、年齢の進むにしたがって次第にその差が開いてゆく。すなわち、期首の樹高と連年樹高生長量とは正の相関関係を保って推移することを示している。実際に $\rho_{H't-1\Delta H't}$ の値を算出し図-2.46 に示した。この図から明らかなように、 $\rho_{H't-1\Delta H't}$ は全生長期間を通じて正の値をとり、かなりの振幅の不規則変動をとまないながら周期変動をす
 傾向を読みとることができる。しかし、この 1 例でみられる $\rho_{H't-1\Delta H't}$

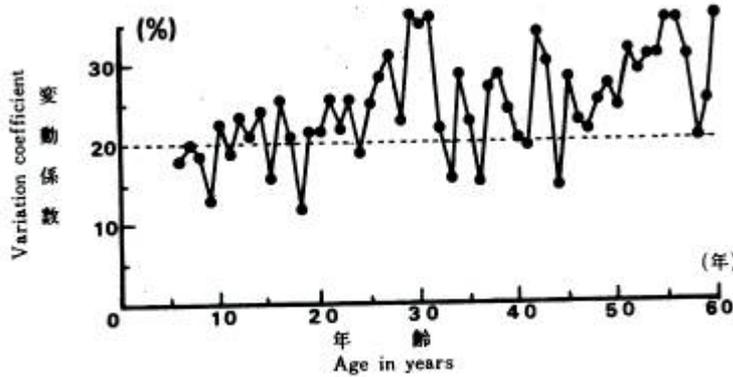


図-2.47 上層木の連年樹高生長量の変動係数の推移
Fig.2.47 Transition of the variation coefficient of annual height increments of the upper-trees on the subplot.

の推移傾向をもって一般的な傾向と断定するほどの生態学的理由は見当らない。そこでここでは、図-2.46で認められる $\rho_{H'_{t-1}, \Delta H'_t}$ 平均的な値である 0.3 を上層木柑高群の示す $\rho_{H'_{t-1}, \Delta H'_t}$ の値であると仮定しておく。次に、同じ上層木群の連年樹高生長量の変動係数を求め、その推移を図-2.47 によって示した。この例では、10%から 35%の範囲内の不規則変動をとめないながら年齢とともに大きくなる傾向がみられる。しかし、

このような変動係数の推移傾向も、 $\rho_{H'_{t-1}, \Delta H'_t}$ の場合と同様に、単に 1 例の結果をもって一般的な傾向として認めるだけの理由を求めることは難しい。そこでこの場合も、図-2.47 上での判断から、上層木群の連年樹高生長量の変動係数は、平均的に 20%であり生長が衰える高齢期には、やや大きくなる傾向をたどるといごく粗い推定をくだすこととどめておく。

以上の上層木群の樹高分散の推移の分析によって、推定された $\rho_{H'_{t-1}, \Delta H'_t}$ と連年樹高生長量の変動係数の値をパラメータとして用いれば、帰納的に上層木樹高の分布範囲を定めることができる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \rho_{H'_{t-1}, \Delta H'_t} &= 0.3 \\ C.V.(\Delta H'_t) &= 20, (\%) \end{aligned} \right\} \dots (2.80)$$

ここで、 $C.V.(\Delta H'_t)$ は上層木群の連年樹高生長量の変動係数と定めれば、上層木群の樹高分散の推移は(2.79)式から

$$\sigma_{H'_t}^2 = \sigma_{H'_{t-1}}^2 + (0.2 \Delta \bar{H}'_t)^2 + 0.12 \sigma_{H'_{t-1}} \Delta \bar{H}'_t \dots (2.81)$$

ここで、 $\Delta \bar{H}'_t$ は上層木群の平均連年樹高生長量で与えられる。ここで、年齢ごとの上層木平均樹高が与えられれば、これに応ずる樹高分散の推移を上の漸化式によって順次求めることができる。上層木平均樹高は、林分の地位と年齢によって定まるものであるが、いま上例の上層木群の平均樹高が与えられたものとして(2.81)式によって求めた上層木の樹高分散の推移を図-2.45 上に示した。

図-2.45 で認められるように、(2.81)式による樹高分散の計算値は、30 年生以降で実測分散を下回る。この傾向は(2.81)式で 30 年生以降の連年生長率の変動係数がやや過小に見込まれているためで、次のシミュレーションの実行の際にこれに対する考慮が払われる。

(2) 上層木樹高生長のシミュレーション

上層木の連年樹高生長量が正規分布にしたがうものとする、前項で検討を加えた樹高分布の推移傾向から、単

$$\Delta H'_t = \Delta \bar{H}'_t + \rho_{H'_{t-1}, \Delta H'_t} \frac{\sigma_{\Delta H'_t}}{\sigma_{H'_{t-1}}} (H'_{t-1} - \bar{H}'_{t-1}) + \varepsilon_t \dots (2.82)$$

木の連年樹高生長量を期首の樹高に対する回帰式

ここで $\Delta \bar{H}'_t$ は t 年における上層木平均樹高の平均連生長量、 \bar{H}'_{t-1} は t-1 年の上層木平均樹高、 $\Delta H'_t$ は t 年における単木の連年樹高生長量、 H'_{t-1} は t-1 年の単木樹高、 ε_t は平均値 0、分散 $\sigma_{\Delta H'_t}^2 (1 - \rho_{H'_{t-1}, \Delta H'_t}^2)$ の正規

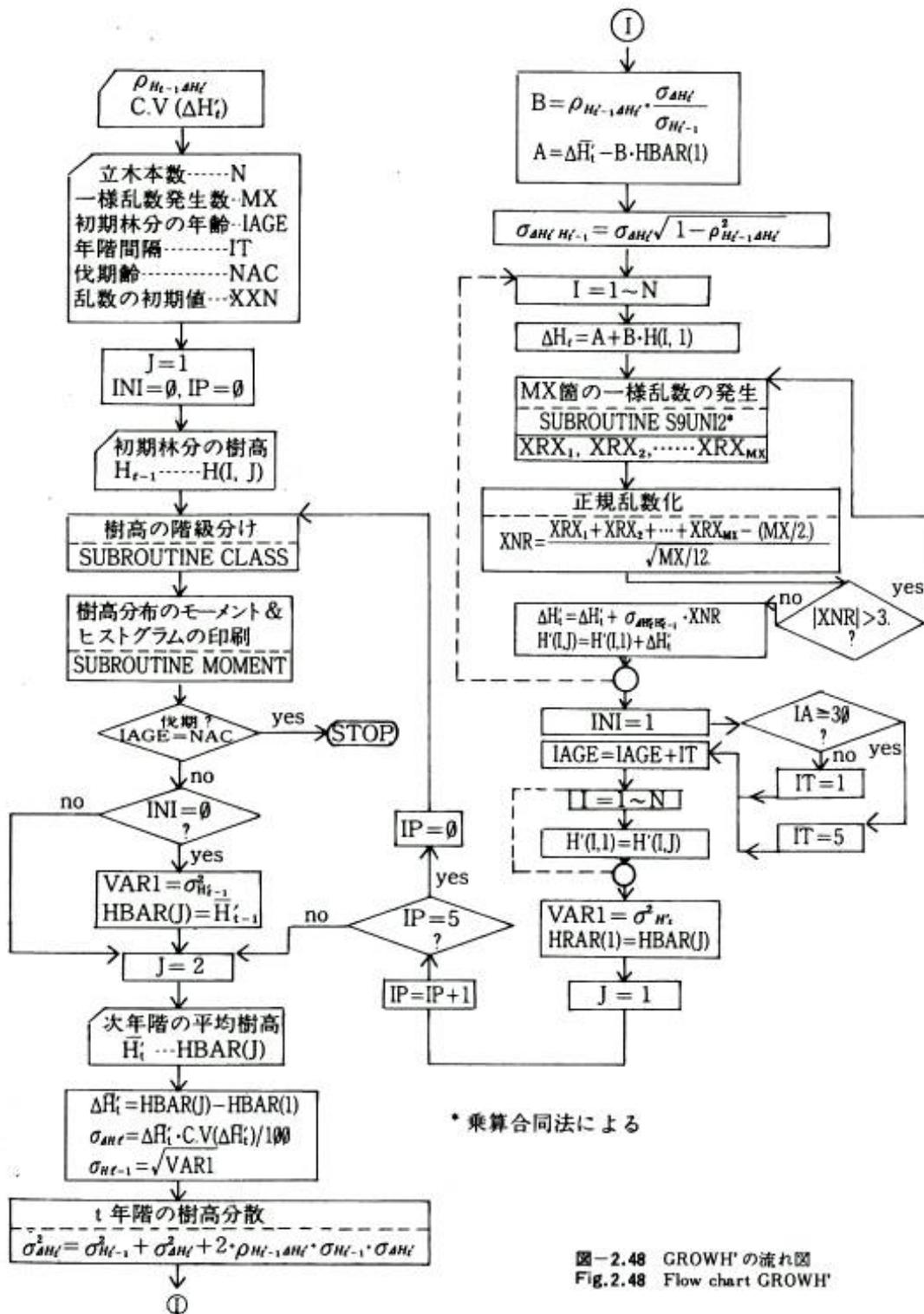


図-2.48 GROWH'の流れ図
 Fig.2.48 Flow chart GROWH'

分布にしたがう互に独立な確率変数

によってモデル化することができる。これから、 t 年における単木の樹高は

$$H_t = H_{t-1} + \Delta H_t \quad \dots (2.83)$$

で与えられる。

前項の樹高分散の推移を与える(2.81)式と、上の(2.82)および(2.83)式を順次年齢を追って適用することによって、与えられた上層木の平均樹高に応ずる上層木群の樹高生長をシミュレートすることができる。このシミュレーション(GROWH)は、図-2.48に示した手順で実行される。

(3) 地位指数曲線の構成

前項の GROWH'によって上層木群の樹高生長のシミュレーションを実行するには、地位に応じた上層木平均樹高の生長曲線を与えなければならない。このために、地位ごとに林分の上層木平均樹高対年齢の関係を示す上層木平均樹高曲線を作成した。

上層木は、本節(1)項定めたように、樹高が被圧または被害による生長阻害を受けることなく、もっぱら林地の地位に応じて生長を遂げる立木である。したがって上層木群の平均樹高は、林分構造に関係なく年齢と地位によって定まる性質のものである。これに対して現実林分では、立木密度によって被圧木の発生の程度が左右され、また間伐によって林分の樹高分布が変化する。そのために同一地位の林分でも上層林冠を構成する立木の樹高範囲の異なる場合が生ずる。一般的には林分の生長にともなって、その平均樹高は上位に移動するものと考えられる。地位ごとの上層木平均樹高曲線を作成する資料は現実林分の測定によって求めなければならない。その場合に以上の点を考慮して、資料林分については完全な被圧木または被害によって劣勢化した立木を除き残りの立木の平均樹高算出し、これを上層木平均樹高とみなすことにした。

ここで用いた貸料林分は、1969年に北海道林務部が実施した人工林のサンプリング調査で収集されたカラマツ人工林の302プロットである。プロットごとに上の基準によって上層木平均樹高を求めた。これらのプロットの上層木平均

樹高の年魚に対する散布状態およびその標準偏差は、それぞれ図-2.49 および図-2.50に示したとおりであった。また、図-2.49の年齢に対する樹高の平均曲線に MITSCHERLICH 式を当てはめた結果

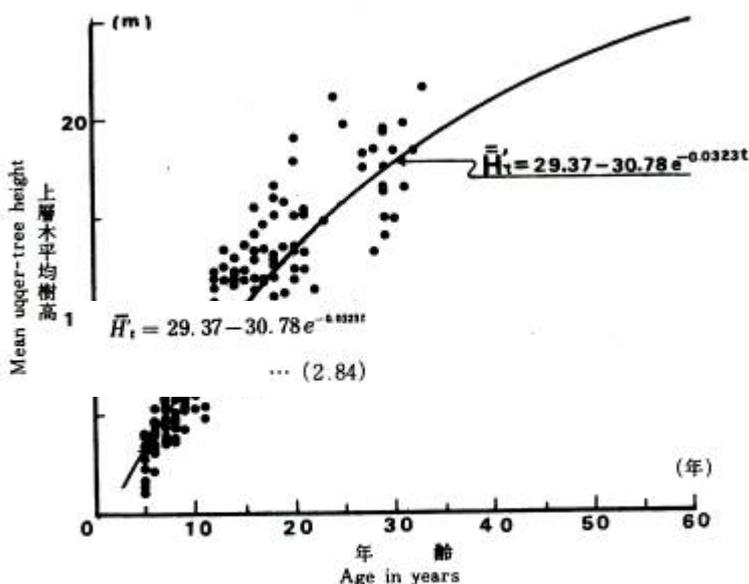


図-2.49 年齢ごとの上層木平均樹高
Fig. 2.49 Distributions of mean upper-tree heights over age.
Plotted data were obtained from plantations of *L. leptolepis* on various sites in the middle Hokkaido district.

$$\bar{H}_t = 29.37 - 30.78 e^{-0.0323t} \quad \dots (2.84)$$

がえられた。この(2.84)式をガイドカーブとし、図-2.50の標準偏差の平滑値を用い西沢⁶⁴⁾(1963)の提示した地位指数曲線の作成法によって30年を基準年齢とする上層木平均樹高曲線(図-2.51)を作成した。

一般にカラマツ人工林に対して

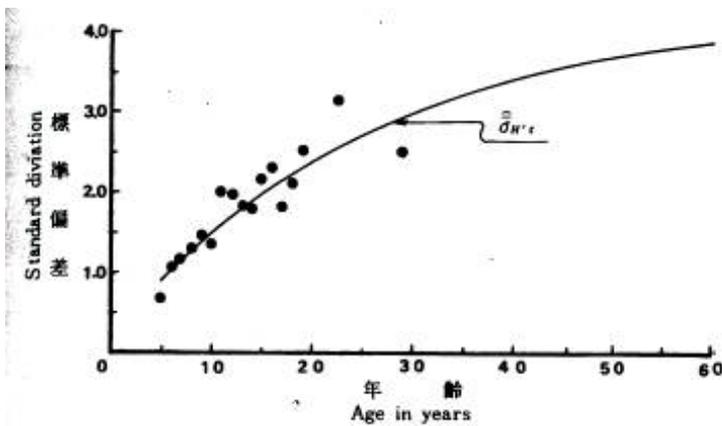


図-2.50 年齢ごとの上層木平均樹高の標準偏差
Fig.2.50 Standard deviation of mean upper-tree height over age.

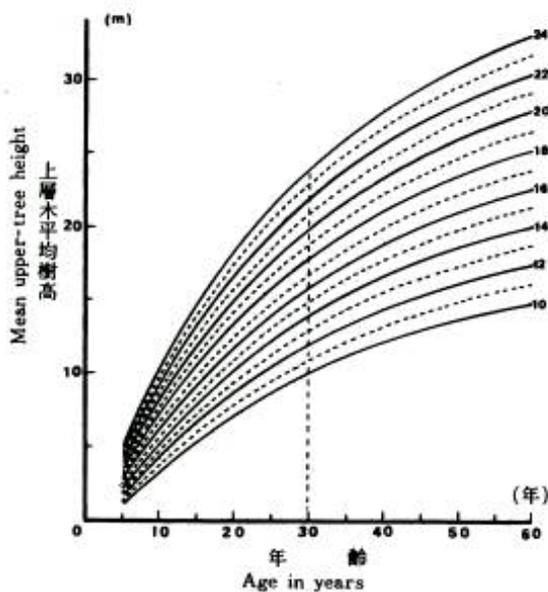


図-2.51 上層木平均樹高曲線
Fig.2.51 Mean upper-tree height curves.

は、主に下層餓が行われる。そのため樹高の上層を占める優勢木は、間伐によって伐採される機会が少なく、伐期まで残される可能性が高い。真辺⁴⁷⁾(1971)は、この点に着目して英国式の上層高を地位の尺度とすることを提案している。すなわち、樹高の上位の立木から順に ha 当り 250 本に相当する本数を取り、その平均樹高をもって林分の上層高とする方法である。この上層高は、立木密度による影響も少なく合理的な地位の尺度といえる。

上層木樹高の正規分布性から、上述の上位樹高木による上層高を上層木平均樹高から次式によって求めることができる。

$$H_{ut} = \bar{H}'_t + \alpha \sigma_{H'_t} \dots (2.85)$$

ここで、 H_{ut} は t 年における上層高、 \bar{H}'_t は同じく上層木平均樹高、 $\sigma_{H'_t}$ は同じく上層木樹高の標準偏差、 α は植栽本数によって定まる係数

英国の国定試験地調査方法書^{注)}では、現存本数を基準とする α の値を用いているが、ここでは上目木の意味から植栽本数を基準とする α の値を採用した。上位樹高木として ha 当り 250 本をとる場合の植栽本数に見合う α の値を表-2.9 に示した。

図-2.52 は、2,500 本/ha の植栽本数の場合について上層木平均樹高曲線に対応する上層高の曲線を示したものである。この曲線は植栽本数によって異なるものであるが、実用上はカラマツ人工林の標準的な植栽本数である 2,500 本/ha の場合について作成しておけば、慣用の地位指数曲線と同様に利用することができよう。なお、この場合に基準年齢 30 年生における各上層高曲線の値を整数値で表わし、これらの値を地位指数、また図-2.52 の上

表-2.9 上層高を算定するための係数の値
Table 2.9 Coefficients to estimate top height.

植栽本数 (本/ha) Initial density (Number of trees/ha)	3,000	2,750	2,500	2,250	2,000
係数 (α) Coefficient	1.77	1.74	1.69	1.64	1.59

注) 英国における固定試験地調査方法書 (邦訳林業試験場経営部森林測定研究資料 1960)

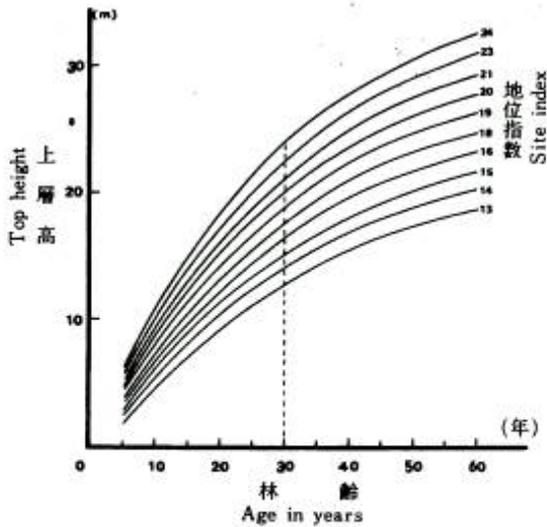


図-2.52 カラマツ人工林の地位指数曲線
 (*250本/haに相当する立木本数の上位樹高の平均樹高)
 Fig.2.52 Site index curves.
 (*Average of the 250 largest height trees)

表-2.10 上層高に対応する上層木平均樹高

Table 2.10 Mean upper-tree height corresponds to the top height.

Unit: meter

地位指数 Site index	年 齢 Age in years											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
24	5.86	10.81	14.94	18.38	21.32	23.81	25.94	27.78	29.35	30.65	31.76	32.72
	3.89	8.30	12.00	15.10	17.75	20.00	21.89	23.53	24.93	26.10	27.10	27.96
20	4.51	8.72	12.30	15.35	17.93	20.14	22.04	23.65	25.02	26.18	27.16	28.01
	2.99	6.74	9.95	12.69	15.01	17.00	18.69	20.12	21.35	22.39	23.27	24.03
16	3.13	6.63	9.67	12.31	14.53	16.45	18.14	19.52	20.71	21.72	22.57	23.29
	2.08	5.18	7.90	10.27	12.27	14.00	15.49	16.72	17.78	18.69	19.45	20.10

注) 上段は地位指数曲線による上層高, 下段は上層木平均樹高曲線による上層木平均樹高を示す
 Note) Upper and lower row represents the top height from Fig. 2.52 and the mean upper-tree height from Fig. 2.51 respectively.

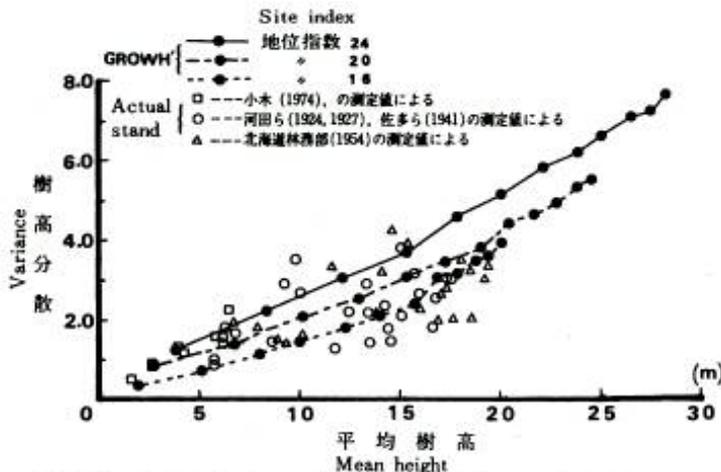


図-2.53 GROWH'によって実現された上層木樹高の分散の推移
 Fig.2.53 Transition of the upper-tree height variance simulated by the GROWH'.

層高の曲線を単に地位指数曲線と呼ぶことにした。上の 2 種の樹高曲線は、著者の作成したコンピュータ・プログラム(SITE INDEX CURVES)によって計算させたものである。なお、このプログラムは、30 年生までは 1 年ごとに、それ以降は 5 年間隔で計算を行うように組まれている。これは、先の 12 本の上層木にみられた生長の後半期における連年樹高生長量の変動係数の拡大傾向を見込むためと、同時に後の林分生長のシミュレーションの計算時間を短縮するためである。表-2.10 は、このプログラムによって出力された地位指数ごとの上層木平均樹高と上層高の 1 例を掲げたものである。以上で構成した 2 種の樹高曲線を利用して、林分の地位に応ずる上層木平均樹高を求めることができる。すなわち、上の曲線構成の手順とは逆に、図-

2.52 の地位指数曲線を介して、与えられた林分の地位に対応する上層木平均樹高曲線を選ぶことができる。

表-2.10 の地位指数 24, 20 および 16 の上層木平均樹高を GROWH'に入力してやり、このシミュレーションで実現された各年階の樹高分散とその分布をそれぞれ図-2.53 および図-2.54 に示した。図-2.53 には、既往の試験林および施業林分で測定された樹高分散の値をプロットした。上層木のみを対象とした GROWH'の結果は、直接

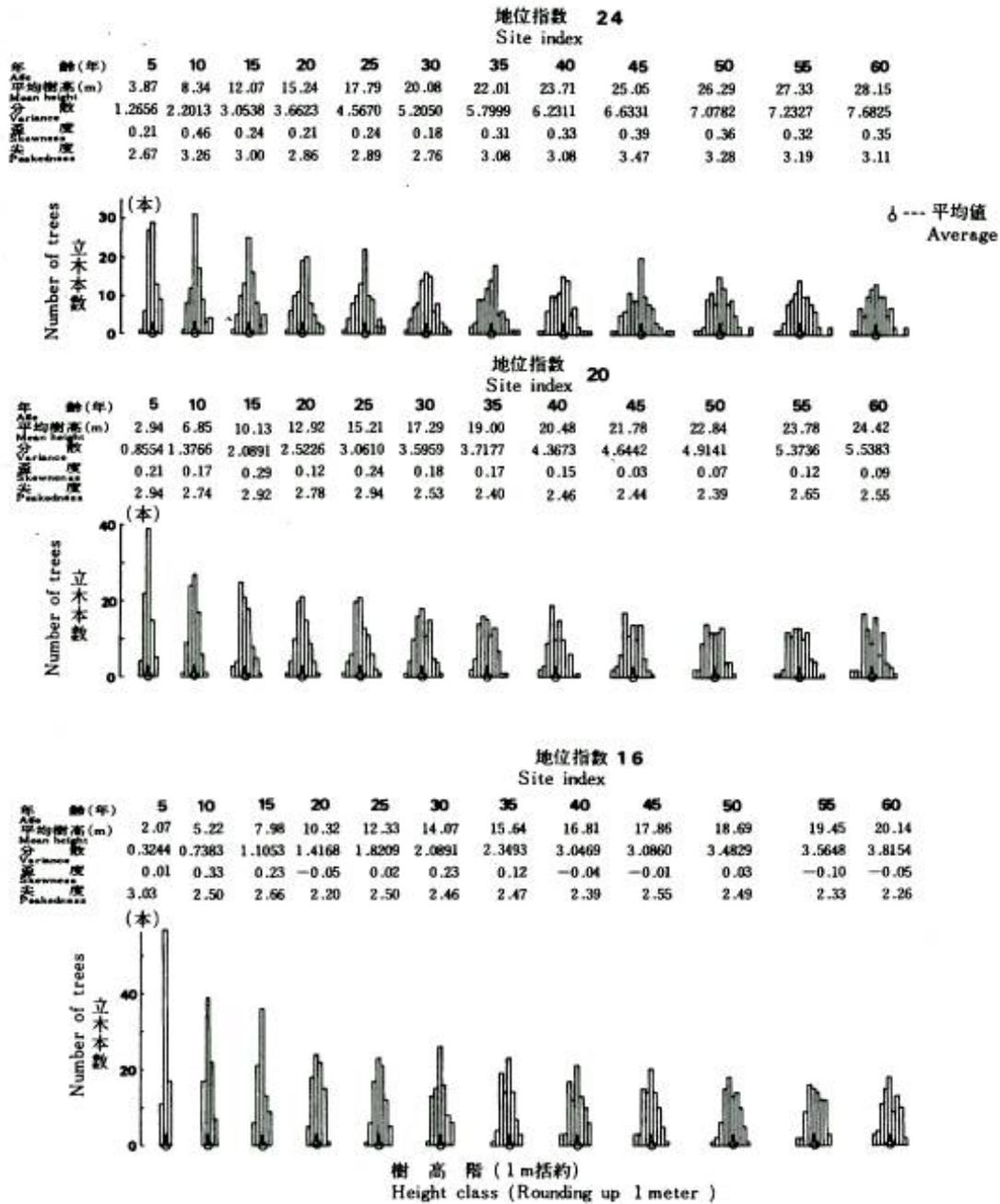


図-2.54 GROWH'によって実現された上層木の樹高分布
Fig.2.54 Distributions of the upper-tree height simulated by the GROWH'.

これらの値とは比較できないが、実測値の範囲内を推移しており、妥当な結果がえられたものと判断される。

(4) まとめ

林分の樹高生長は、立木密度による影響を受けることが少なく、林地の地位を測る好適な尺度とされている。もし、立木が被圧や被害による生長阻害を受けなければ、もっぱらこの林地の地位に応じた樹高生長を遂げることになる。ここでは、このような理想的な立木を上層木と呼び、林分の1次的な樹高生長として上層木からなる林分の樹高生長のモデル化を図った。

60年生に達した現実林分から、上層木の条件に適合した樹高生長を遂げてきたと認められる12本の立木群を選び、樹幹解析を行ってその樹高生長の推移を分析した。この上層木の連年樹高生長量の変動係数は、年々かなりの不規則変動をとまうが、ほぼ20%前後で推移するものと推定された。すなわち、この値は立木の樹高が外因的な生長阻害を受けない場合の連年生長量の変動の大きさとみなされるものである。

もし、連年樹高生長量が、年齢ごとに独立であれば、樹高分散はそれまで経過してきた連年樹高生長量の分散の和と一致する。12本の上層木の樹高分散は、この仮定に反して林分の生育段階の進むにつれて大きくなる傾向で推移してきている。この分散の拡大傾向は、上層木の期首の樹高と連年樹高生長量との相関係数 $\rho_{H_{t-1}, \Delta H_t}$ に起因していることが確かめられた。KOZLOWSKI⁴¹⁾(1962)は立木の樹高生長が、直前の生長期に体内に蓄積された炭水化物の多寡によって影響されることを明らかにしている。相関係数 $\rho_{H_{t-1}, \Delta H_t}$ は、このような樹高生長の生理的特性の数値的表示ともみなされよう。12本の上層木 $\rho_{H_{t-1}, \Delta H_t}$ のは、全生長期間を通じて正の値を示し、年々不規則的な変動をとまうが、その平均的な値は0.3と推定された。

以上の分析結果をよりどころとし、単木の樹高生長量を期首の樹高の回帰式で表わす統計的モデルを構成し、これによって上層木の樹高生長を実現させるシミュレーション・プログラムGROWH'を組んだ。

さらに、林分の上層高から地位指数を判定し、それぞれに対応する上層木平均樹高を求める方法を提示した。この結果、対象林分の地位に応じた上層木平均樹高を選択し、これをGROWH'に入力してやり、上層木の樹高生長を実現させる一連のシステムが構成できた。

本節で求めたモデルは、理想的な条件のもとで期待される林分の樹高生長を対象にしたもので、いわば1次的なモデルである。これを現実林分の樹高生長に対応できるものにするには、さらにこのモデルに被圧による樹高生長の劣勢化の機構を組み込むことが必要である。この点に関しては、次章での林分生長のシミュレーションの実行段階で考慮される。