

# 東京大学秩父演習林のスギ・ヒノキ・サワラ・カラマツの 生長試験地における間伐効果の解析

Analysis of Thinning Effects on Diameter Increment of  
Japanese cedar, Hinoki cypress, Sawara cypress, Japanese  
larch Experimental Plots in Tokyo University Forest at  
Chichibu

山本 博一,\*伊藤 幸也,\*大畑 茂,\*佐々木 和男,\*大村 和也\*

Hirokazu YAMAMOTO, Koya ITO, Shigeru OHATA, Kazuo SASAKI and Kazuya OMURA

## I 結 言

この研究の目的は、間伐の結果、個々の林木の直径生長がどのような影響を受け、また林分としてはどのような形で変化するかを、間伐林分と無間伐林分の直径生長を比較することによって明らかにすることにある。

さて、「間伐効果」という言葉をどのように定義づけるかは、各々の林分の施業方針によって異なる。すなわち、大径木の生産を目指すのか、あるいは中径木の生産を目指すのかによって間伐の目的は自ずと異なる。したがって、間伐効果もそれぞれの施業方針によって、直径上位木の生長促進であったり、断面積生長量の増加であったり、あるいは生産される丸太の均質化であったりする。

そこで、筆者らは、このように多様な間伐効果のとらえかたがあるという認識のもとに、間伐が林木の直径生長に及ぼす影響を平均直径、直径分布形、直径生長率、生長曲線の係数、大径木本数、胸高断面積合計、丸太生産量などの様々な角度から検討した。

本研究をおこなうにあたり、間伐試験地を設定し長年にわたり測定を継続された佐藤修元秩父演習林長、若林義男講師および東京大学秩父演習林の職員各位に対して心より感謝を申し上げます。

---

\*東京大学農学部秩父演習林

University Forest at Chichibu, Faculty of Agriculture, University of Tokyo.

## II 資 料

本研究に用いた資料は、東京大学秩父演習林内のスギ4箇所、ヒノキ3箇所、サワラ3箇所、カラマツ1箇所の各間伐試験地の直径生長測定結果<sup>14)</sup>およびスギ・ヒノキの樹幹解析資料<sup>13)</sup>である。

間伐試験地は間伐後の材木の生長経過を比較するために、林齢29～48年生時における間伐の際に設定された。各試験地は、通常の間伐施業区のほかに、隣接した同一条件の林分内に、植栽後同じ取り扱いを受けてきた無間伐比較区を併設している。また、このうちのスギ、ヒノキ、サワラ、カラマツの各一箇所の試験地では、間伐区が強度間伐区と弱度間伐区に分けられている。胸高直径の測定は、試験地設定以降15～25年間にわたり、3～6回行われた。各測定木には番号が付されており、単木ごとの生長が時系列的に記録されている。なお、試験地の概要および間伐の内容は表1のとおりである。

以下に示す図表においては、スギは Japanese cedar, ヒノキは Hinoki cypress, サワラは Sawara cypress, カラマツは Japanese larch と表し、それぞれ表1の Yatakezawa A,B, C, Iriyama C,D,E, Iriyama F,G,H, Iriyama I,J,K の測定結果を例示した。

樹幹解析資料は、間伐試験地とは別の37～55年生のスギ・ヒノキ林分から採取された、89本の資料である。2 m 間隔の各断面高の円板から一年ごとに読み取られた四方向の直径数値からなっている。

## III 間伐効果に対する考え方

最も単純な間伐効果の評価方法として、間伐後一定期間を経過した平均胸高直径を、間伐区と無間伐区の間で比較することが考えられる。しかし、全層間伐の場合を除いて上層間伐や下層間伐の場合は、伐採によって直径分布の形が変化するためその効果を過小評価あるいは過大評価することになる。なぜならば、下層間伐の場合、間伐区では生長の悪い劣勢木が間伐の結果、平均値の計算から取り除かれるのに対し、無間伐区では劣勢木も平均値に含まれてしまうからである。その後の生長経過を比較する場合でも、無間伐区では生長の悪い劣勢木の生長がかなり大きいウエイトで平均値に影響を与える。本来、間伐効果を評価するには間伐後の残存木が無間伐の場合と比べてどれだけ生長に差異が生じるかをみるべきである。

その具体例をサワラ間伐試験地の資料を用いて示すと表2のようになる。ここでは、間伐木の平均胸高直径と間伐前の平均胸高直径の比が0.85:1、間伐率が本数比で55%となるような下層間伐がなされている。その結果、間伐直後の時点ですでに、平均胸高直径は15.75cmから

表—1 試験地林分の概要

Table 1 General description of the experimental plots

試 験 地 名 Plot name	面 積 Area (㎡)	標 高 Altitude (m)	設 定 時 Initial state					最 終 測 定 時 Final state				測定回数 No. of measure
			林 齢 Age (yr)	立木本数 No. of trees (no./ha)	間伐の内容 Degree of thinning	間伐率 Thinning rate (%)	平均直径 比 Rate of mean diameter	林 齢 Age (yr)	立木本数 No. of trees (no./ha)	胸高断面 積 合 計 Basal area (㎡)	平均樹高 Mean height (m)	
Japanese cedar												
Yatakezawa A	2387	950	29	1596	Unthinned	0	—	54	1382	103.32	27.1	6
Yatakezawa B	3393	950	29	890	Heavily thn.	40	0.804	54	822	69.80	26.7	6
Yatakezawa C	3046	950	29	1080	Lightly thn.	37	0.822	54	1031	88.76	27.6	6
Yatakezawa D	710	950	29	1577	Unthinned	0	—	54	1394	102.31	26.2	6
Yatakezawa E	839	950	29	1299	Lightly thn.	30	0.838	54	1216	86.91	27.1	6
Iriyama A	1280	850	38	794	Properly thn.	26	0.834	59	760	61.89	26.5	4
Iriyama B	1184	850	38	1273	Unthinned	0	—	59	1141	81.66	27.3	4
Youkurazawa A	583	1080	40	1029	Properly thn.	29	0.902	55	1029	65.75	23.7	3
Youkurazawa B	502	1080	40	2251	Unthinned	0	—	55	1773	87.53	23.1	3
Hinoki cypress												
Iriyama C	1054	1050	33	1205	Heavily thn.	46	0.777	57	1176	71.72	19.5	5
Iriyama D	1125	1050	33	1698	Lightly thn.	21	0.649	57	1476	72.91	19.1	5
Iriyama E	1106	1050	33	2061	Unthinned	0	—	57	1618	75.47	18.8	5
Yatakezawa F	707	950	32	1853	Unthinned	0	—	55	1513	75.14	21.0	5
Yatakezawa G	1002	950	32	1647	Properly thn.	6	0.868	55	1028	64.14	21.4	5
Youkurazawa C	546	1080	40	1026	Properly thn.	15	0.882	55	1026	51.01	18.6	3
Youkurazawa D	573	1080	40	2426	Unthinned	0	—	55	2129	80.47	17.7	3
Sawara cypress												
Iriyama F	1360	1075	33	1184	Heavily thn.	55	0.848	57	1081	65.13	21.3	5
Iriyama G	1668	1075	33	1739	Lightly thn.	36	0.791	57	1601	74.41	20.2	5
Iriyama H	703	1075	33	2987	Unthinned	0	—	57	2006	83.16	19.5	5
Yatakezawa H	724	950	32	1340	Unthinned	0	—	55	1105	74.16	23.3	4
Yatakezawa I	1514	950	32	575	Properly thn.	16	0.553	55	522	56.96	22.8	4
Youkurazawa E	713	1080	40	982	Properly thn.	33	0.866	55	982	58.31	22.6	3
Youkurazawa F	694	1080	40	1643	Unthinned	0	—	55	1427	69.54	21.6	3
Japanese larch												
Iriyama I	1138	1100	33	756	Heavily thn.	44	0.804	57	747	33.83	21.4	5
Iriyama J	1111	1100	33	963	Lightly thn.	36	0.777	57	936	34.97	20.5	5
Iriyama K	1360	1100	33	1632	Unthinned	0	—	57	1088	42.09	20.5	5

注) 1. 間伐率=間伐木の株数/間伐前の株数

2. 平均直径比=間伐木の平均直径/間伐前の平均直径

18.71cmにふえている。他方、無間伐区の平均胸高直径は15.15cmにとどまっている。したがって、無間伐区の平均胸高直径を100とした場合の間伐区の指数は間伐当初から123.5と開いていたのである。この指数は9年後には128.8、18年後には125.0、25年後には122.6となる。

このように下層間伐の場合、林分の平均胸高直径の比較によって間伐の効果を評価しようとすると、その効果を過大評価することになる。ここでは、改めて比較の方法を考えることにする。

## 1 平均胸高直径による比較

上述のような問題点を考慮して、平均値での間伐効果の評価を行うとするならば、間伐時における直径分布の違いを考慮することが必要である。その場合、一つの考え方として、どちらか片方の試験区の直径分布を、加重平均によって補正して比較することが考えられる<sup>15)</sup>。そこ

で、無間伐区の直径分布が間伐直後の間伐区の直径分布に一致するように、間伐時における無間伐区の本数に重みを付けて補正し、その後の直径分布を比較した。その結果は表－2のとおりである。

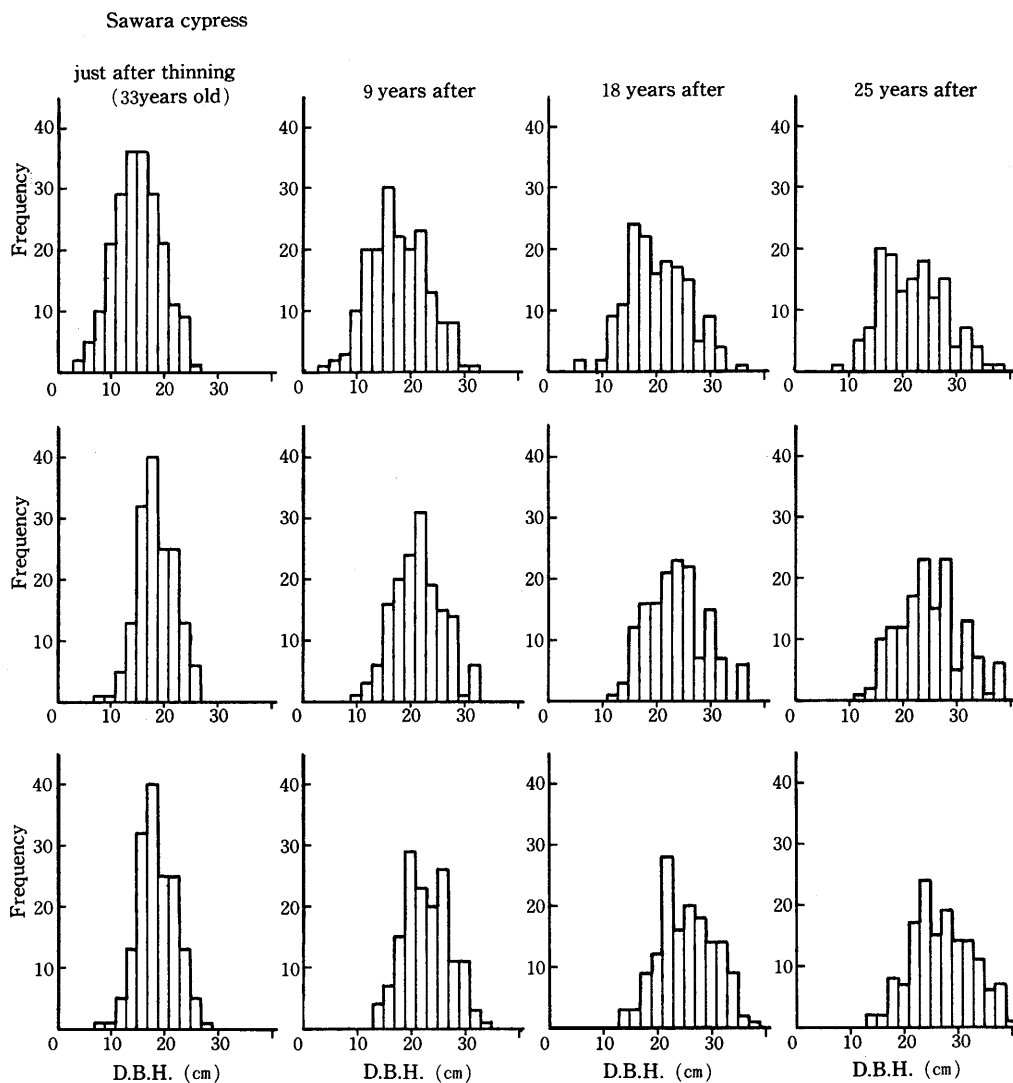
ここでは各直径階ごとに、間伐直後における間伐区に対する無間伐区の本数の比を求め加重平均の重みとした。例えば、間伐時において14cmの直径階にあった無間伐区の林木については、間伐区に対する本数の比が13対36(=0.361:1)となるので、無間伐区の1本の林木を0.361本とみなして平均値の計算に加えた。また、6cmの直径階にあった林木については、1本の林木を0本とみなして存在しないものとした。このようにして、直径分布を補正すると図－1の上段の図から中段の図になる。

このような補正を加えて平均値を計算した結果、無間伐区に対する間伐区の平均値の比は9年後には106.5、18年後には107.8、25年後には108.0となった。補正を加えていない場合、その比は、9年後には128.8、18年後には125.0、25年後には122.6であったので、直径分布の違いを修正しないと平均値の過大評価が生じることがわかる。しかし、このことは、無間伐区に枯損木が発生し、直径分布の形が間伐区の形に近づくことによって、時間の経過とともに緩和され

表－2 加重平均による直径分布の補正

Table 2 Correction of diameter distribution by the weighted mean

直径階 (cm)	間伐直後				9年後			18年後			25年後		
	間伐区				無間伐区			間伐区			無間伐区		
	実際の直径分布①	実際の直径分布②	補正係数③=①/②	補正後の直径分布	実際の直径分布	実際の直径分布	補正後の直径分布	実際の直径分布	実際の直径分布	補正後の直径分布	実際の直径分布	実際の直径分布	補正後の直径分布
4	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	5	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0
8	1	10	0.100	1	0	3	0	0	0	0	0	1	0
10	1	21	0.048	1	0	10	1	0	2	0	0	0	0
12	5	29	0.172	5	0	20	3	0	9	1	0	5	1
14	13	36	0.361	13	4	20	6	3	11	3	2	7	2
16	32	36	0.889	32	7	30	16	3	24	12	2	20	10
18	40	29	1.379	40	15	22	20	9	22	16	8	19	12
20	25	21	1.190	25	29	20	24	12	16	16	7	13	12
22	25	11	2.273	25	23	23	31	28	18	21	17	15	17
24	13	9	1.444	13	20	13	19	16	17	23	24	18	23
26	5	1	6.000	6	26	8	15	20	15	22	15	12	15
28	1	0	—	0	11	8	14	18	5	7	19	15	23
30					11	1	1	14	9	15	14	4	5
32					3	1	6	14	4	7	14	7	13
34					1	0	0	9	0	0	11	4	7
36								2	1	6	6	1	1
38								1	0	0	7	1	6
40											1	0	0
合計	161	210		161	150	182	156	149	155	149	147	142	147
平均直径	18.71④	15.15⑤		18.70⑥	22.99④	17.85⑤	21.59⑥	25.50④	20.40⑤	23.66⑥	27.07④	22.08⑤	25.06⑥
補正前の平均値の比④/⑤			1.235			1.288			1.250		1.226		
補正後の平均値の比④/⑥			1.001			1.065			1.078		1.080		
過大評価率		⑥/⑤	1.234			1.210			1.160		1.135		



図一 1 加重平均による直径分布の補正

Fig. 1 Correction of diameter distribution by the weighted mean

注) 上段は無間伐林分, 中段は加重平均によって補正された無間伐林分の直径分布, 下段は間伐林分, 間伐時における無間伐林分の直径分布が間伐林分の直径分布に一致するよう, 補正が加えられている。(一番左の中段と下段)

る傾向にある。

以上のように, 直径分布の形の異なる二つの林分に対する間伐の影響を, 平均胸高直径によって評価する場合, 平均直径の差異の中には, 伐採による直径分布の変化に起因するものと各林木の生長が促進されることに起因するものの二つの因子があることを考慮しなければならない。

したがって、各林木の生長の促進だけを取り出して評価するためには、直径分布を補正して比較するか、あるいは、間伐林分と無間伐林分の個々の林木について、直径生長を間伐時の直径の大きさによって区分し、それぞれの直径階ごとに比較するべきである。

## 2 直径分布形による比較

このように、間伐効果を平均胸高直径によって比較する方法には、当初の直径分布の違いによる差異が生じるため問題があると思われる。そこで、林分の状況を直径分布の形で表現して、間伐によって、その形がどのような影響を受けるかを、変動係数と歪度の二つの指標を用いて分析を行うことにする。

まずはじめに、変動係数を用いて、間伐区と無間伐区の直径分布の形を比較することにする(表-3)。ある林分を一定の間隔をおいて測定する時、二時点間の直径分布の変動係数の値に差異が生じる。この差異は3つの要因によって起こるものと考えられる。それは伐採によるもの、枯損木の発生によるもの、各直径階の林木の生長速度の違いによるものである。

これらの要因を分離するために、測定期間ごとに、その間に枯損しなかった林木をとりだし、その直径分布の変動係数を、測定期間の期首と期末において求める。そうすると、測定期間の期首と期末における変動係数の差異は、当該期間中の各直径階の林木の生長速度の違いによるものとみなすことができる。また、ある測定期間の期末と次の測定期間の期首との間の変動係数の差異は、次の測定期間中に発生した枯損によるものとみなすことができる。

今回の分析の対象とした試験地の間伐は下層間伐であるので、間伐区では伐採によって直径下位木が取り除かれて、間伐直後の変動係数は無間伐区と比較して小さな値になっている。

一般的に枯損は直径下位木に多く発生するので、変動係数を減少させる要因となり、無間伐区において測定期間の期末と次の測定期間の期首の変動係数の間に大きな差異を生じている。

一方、各直径階の林木の生長速度の違いによる変動係数の変化は、間伐区においては比較的小さく、無間伐区においては変動係数が増加している。

次に、直径分布の形の指標として歪度を用いて間伐の効果を比較する(表-4)。歪度  $\gamma$  は次の式によって求められる。

$$\gamma = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}$$

ただし、 $\bar{x}$ 、 $\sigma$  はそれぞれ直径の平均と標準偏差を表し、 $n$  は立木本数である。その値は、分布形の左右の偏り具合を示す。 $\gamma = 0$  の場合左右対称であり、 $\gamma < 0$ 、 $\gamma > 0$  はそれぞれ右偏、左偏した分布形を表す。

歪度の変化も変動係数の場合と同様に、伐採によるもの、枯損木の発生によるもの、各直径階の林木の生長速度の違いによるものに分けて考えられる<sup>7)</sup>。伐採による歪度の変化は下層間

伐の場合、直径下位木が取り除かれて分布形が左に偏り歪度が増加する。また、直径下位木における枯損の発生も歪度を増加させる方向に働いている。

歪度の変化をみると、間伐区においては、間伐後しばらくの間は減少あるいは横ばいの状態が続いているのに対して、無間伐区においては、増加して直径分布の形が左の方に偏る傾向にある。

枯損による歪度の変化と生長による歪度の変化を併せて考えてみると、無間伐区においてはその値が大きく増加しているのに対して、間伐区では安定した値を保っている。

表—3 変動係数の増減

Table 3 Fluctuation of the coefficient of variation of diameter distribution

樹種 species	間伐強度 thinning intensity	林 齢 Age (yr)	測定本数 No. of trees	期首の値(A) Initial value	期末の値(B) Final value	増減(B-A) Increment of the c.v.
Japanese cedar						
Heavily thn.		29 — 32	302	0.229	0.226	−0.003
		32 — 36	294	0.217	0.221	0.004
		36 — 40	293	0.221	0.224	0.003
		40 — 48	281	0.224	0.236	0.012
		48 — 54	279	0.233	0.243	0.010
Lightly thn.		29 — 32	328	0.198	0.198	−0.000
		32 — 36	325	0.198	0.203	0.005
		36 — 40	322	0.204	0.214	0.010
		40 — 48	317	0.208	0.224	0.016
		48 — 54	314	0.219	0.231	0.012
Unthinned		29 — 32	363	0.256	0.258	0.002
		32 — 36	360	0.257	0.264	0.007
		36 — 40	359	0.262	0.274	0.012
		40 — 48	344	0.254	0.271	0.017
		48 — 54	330	0.255	0.268	0.013
Hinoki cypress						
Heavily thn.		33 — 38	127	0.185	0.185	0.000
		38 — 42	126	0.186	0.189	0.003
		42 — 51	125	0.186	0.202	0.016
		51 — 57	124	0.198	0.208	0.010
Lightly thn.		33 — 38	189	0.213	0.223	0.010
		38 — 42	182	0.206	0.215	0.008
		42 — 51	172	0.193	0.210	0.017
		51 — 57	166	0.197	0.204	0.007
Unthinned		33 — 38	215	0.271	0.280	0.009
		38 — 42	202	0.260	0.270	0.010
		42 — 51	183	0.216	0.238	0.022
		51 — 57	179	0.231	0.241	0.010

## Sawara cypress

Heavily thn.	33 — 38	153	0.180	0.187	0.007
	38 — 42	150	0.186	0.188	0.002
	42 — 51	149	0.188	0.203	0.015
	51 — 57	147	0.200	0.211	0.011
Lightly thn.	33 — 38	290	0.219	0.228	0.009
	38 — 42	285	0.215	0.225	0.010
	42 — 51	275	0.201	0.220	0.020
	51 — 57	267	0.204	0.217	0.012
Unthinned	33 — 38	189	0.260	0.280	0.020
	38 — 42	182	0.273	0.294	0.021
	42 — 51	155	0.248	0.277	0.029
	51 — 57	141	0.244	0.262	0.018
Japanese larch					
Heavily thn.	33 — 38	86	0.139	0.148	0.009
	38 — 42	86	0.148	0.162	0.014
	42 — 51	86	0.162	0.177	0.015
	51 — 57	85	0.177	0.191	0.015
Lightly thn.	33 — 38	107	0.121	0.133	0.012
	38 — 42	107	0.133	0.149	0.016
	42 — 51	105	0.148	0.175	0.027
	51 — 57	104	0.174	0.187	0.013
Unthinned	33 — 38	212	0.234	0.249	0.016
	38 — 42	208	0.249	0.272	0.023
	42 — 51	161	0.208	0.237	0.029
	51 — 57	148	0.223	0.242	0.019

表—4 歪度の増減

Table 4 Fluctuation of the skewness of diameter distribution

樹種 species	間伐強度 thinning intensity	林 齢 Age (yr)	測定本数 No. of trees	期首の値(A) Initial value	期末の値(B) Final value	増減(B-A) Increment of the skewness
Japanese cedar						
Heavily thn.		29 — 32	302	0.085	0.085	-0.000
		32 — 36	294	0.161	0.233	0.072
		36 — 40	293	0.227	0.203	-0.024
		40 — 48	281	0.187	0.143	-0.044
		48 — 54	279	0.171	0.161	-0.010
Lightly thn.		29 — 32	328	-0.028	-0.056	-0.028
		32 — 36	325	-0.049	-0.052	-0.003
		36 — 40	322	-0.055	-0.064	-0.009
		40 — 48	317	-0.025	-0.018	0.006
		48 — 54	314	0.011	0.007	-0.004



Unthinned	29 — 32	363	-0.306	-0.301	0.005
	32 — 36	360	-0.304	-0.274	0.030
	36 — 40	359	-0.263	-0.217	0.045
	40 — 48	344	-0.090	-0.061	0.029
	48 — 54	330	-0.017	-0.008	0.009
Hinoki cypress					
Heavily thn.	33 — 38	127	0.063	0.039	-0.024
	38 — 42	126	0.029	-0.028	-0.057
	42 — 51	125	-0.009	-0.046	-0.038
	51 — 57	124	-0.012	-0.046	-0.033
Lightly thn.	33 — 38	189	-0.152	-0.255	-0.104
	38 — 42	182	-0.180	-0.186	-0.006
	42 — 51	172	0.005	-0.073	-0.078
	51 — 57	166	0.008	0.051	0.042
Unthinned	33 — 38	215	-0.274	-0.285	-0.011
	38 — 42	202	-0.315	-0.297	0.018
	42 — 51	183	0.036	0.016	-0.020
	51 — 57	179	0.023	0.010	-0.014
Sawara cypress					
Heavily thn.	33 — 38	153	0.052	0.069	0.017
	38 — 42	150	0.036	0.027	-0.009
	42 — 51	149	0.032	0.057	0.024
	51 — 57	147	0.084	0.074	-0.010
Lightly thn.	33 — 38	290	-0.285	-0.355	-0.069
	38 — 42	285	-0.238	-0.271	-0.033
	42 — 51	275	0.030	-0.005	-0.035
	51 — 57	267	0.183	0.176	-0.007
Unthinned	33 — 38	189	0.016	0.054	0.039
	38 — 42	182	0.086	0.153	0.067
	42 — 51	155	0.166	0.220	0.055
	51 — 57	141	0.428	0.392	-0.036
Japanese larch					
Heavily thn.	33 — 38	86	0.209	0.185	-0.024
	38 — 42	86	0.185	0.206	0.021
	42 — 51	86	0.206	0.060	-0.146
	51 — 57	85	0.037	-0.023	-0.060
Lightly thn.	33 — 38	107	0.258	0.293	0.035
	38 — 42	107	0.293	0.299	0.006
	42 — 51	105	0.275	0.267	-0.008
	51 — 57	104	0.253	0.220	-0.033
Unthinned	33 — 38	212	0.226	0.276	0.049
	38 — 42	208	0.276	0.349	0.074
	42 — 51	161	0.621	0.621	-0.000
	51 — 57	148	0.647	0.612	-0.035

### 3 直径生長率による比較

ここでは、同一林分内の各林木の直径生長を比較するのに、生長量ではなく、生長率を用いることにする。なぜならば、生長量はその林木の大きさに依存しており、直径の大ききの異なる林木の生長を比較するにはその生長率を比較する方がより客観的であると考えからである<sup>10)</sup>。

そのために、各林木の胸高直径について、測定期間ごとにライブニッツ式により年平均生長率を求め、その生長を三つの方法で比較する。

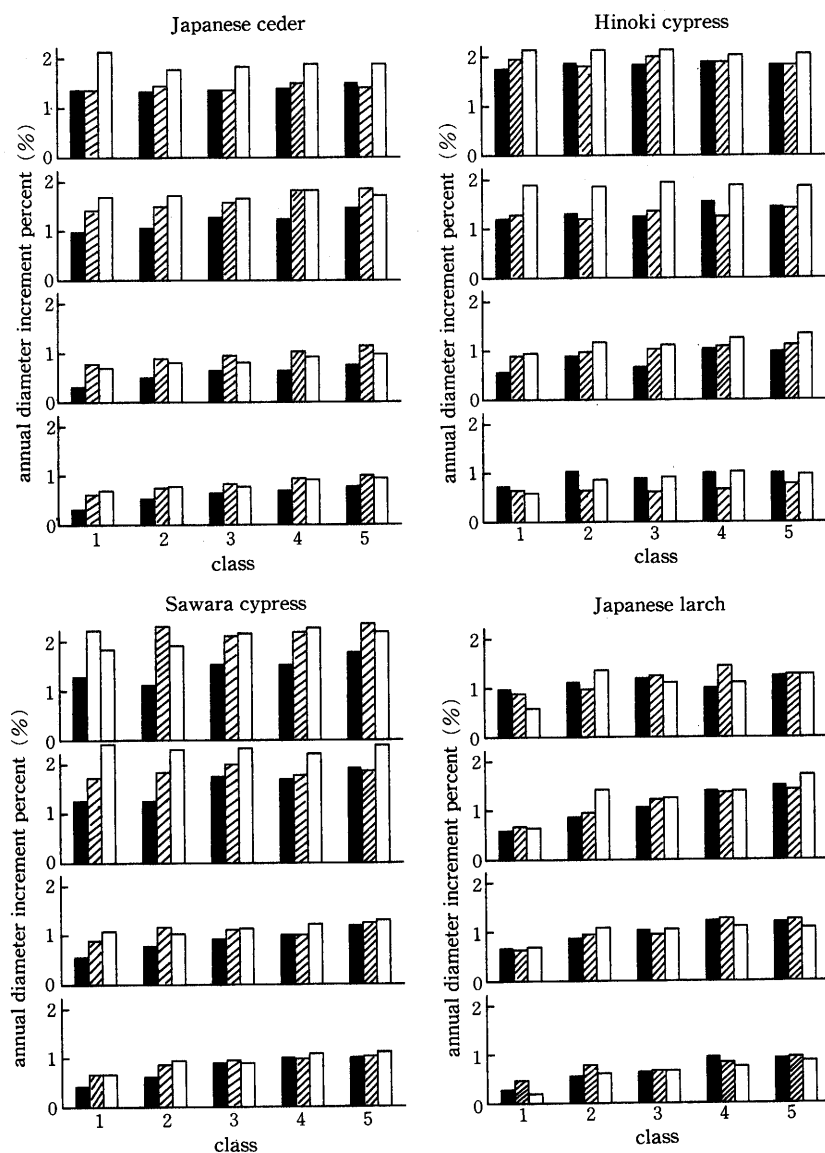
第一の方法は、各階層ごとに期首において、同じ直径階層にある林木の胸高直径の年平均生長率を比較する方法である(図-2)。そのために、間伐後の各測定期間ごとに、間伐区の林木を期首における胸高直径の大ききの順に並べて、各階層の本数が等しくなるように階層化を行い、各階層ごとに期首において同じ直径階層にあった無間伐区の林木の胸高直径の年平均生長率と比較した<sup>14)</sup>。

この図から、間伐直後の時期には、下位の直径階層において間伐区と無間伐区の直径生長率の間に顕著な差異が生じていることが認められる。そして、この傾向は強度に間伐を行った方が早期にかつ顕著に現れている。また、上位の直径階層においても間伐区と無間伐区との間に生長率の差異が認められるが、下位におけるほど顕著ではない。しかし、間伐後十分に時間が経過してからは、間伐区と無間伐区との間の上・中位階層における直径生長率の差異は徐々に解消する。ただし、カラマツについてはこの傾向は当てはまらず、間伐区と無間伐区との間に差異は認められない。

第二の方法は、各林木を期首における胸高直径の大ききの順に並べ、ha 当りに換算した各直径順位階層(100本)ごとの年平均直径生長率を比較する方法である<sup>16)</sup>(図-3)。この方法では間伐区ごとに、本数密度によって階層の数が異なるため、同じ順位階層であっても期首における胸高直径の大ききは異なる。この図から、間伐区では間伐の結果、上位から下位までの各直径順位階層にわたり、ほぼ一様な生長率を示していることがわかる。また、無間伐区と比べて全体の生長率が向上している。しかし、時間の経過にともない全体の生長率は低下し、下位との直径順位階層から上位との年平均生長率の差異が開いてくる。

第三の方法は、第二の方法の延長線上にあつて、直径上位木と下位木の年平均直径生長率の関係を相対化して表現する方法である(図-4)。そのために、各林木を期首における胸高直径の大ききの順に並べ、各階層の本数が等しくなるよう5つに区分する。そして、各測定期間ごとに最上位の階層の年平均直径生長率を100として、各階層の生長率を相対値として表現する。

図-4 から、間伐の結果、直径上位木と下位木の生長率の差が縮まっていることが認められる。そこで、筆者らは上位木と下位木の生長率の差がどの程度開いているかを数量的に表現するために、5つの階層の相対値の平均値を「相対的生長指数」と呼ぶことにした。

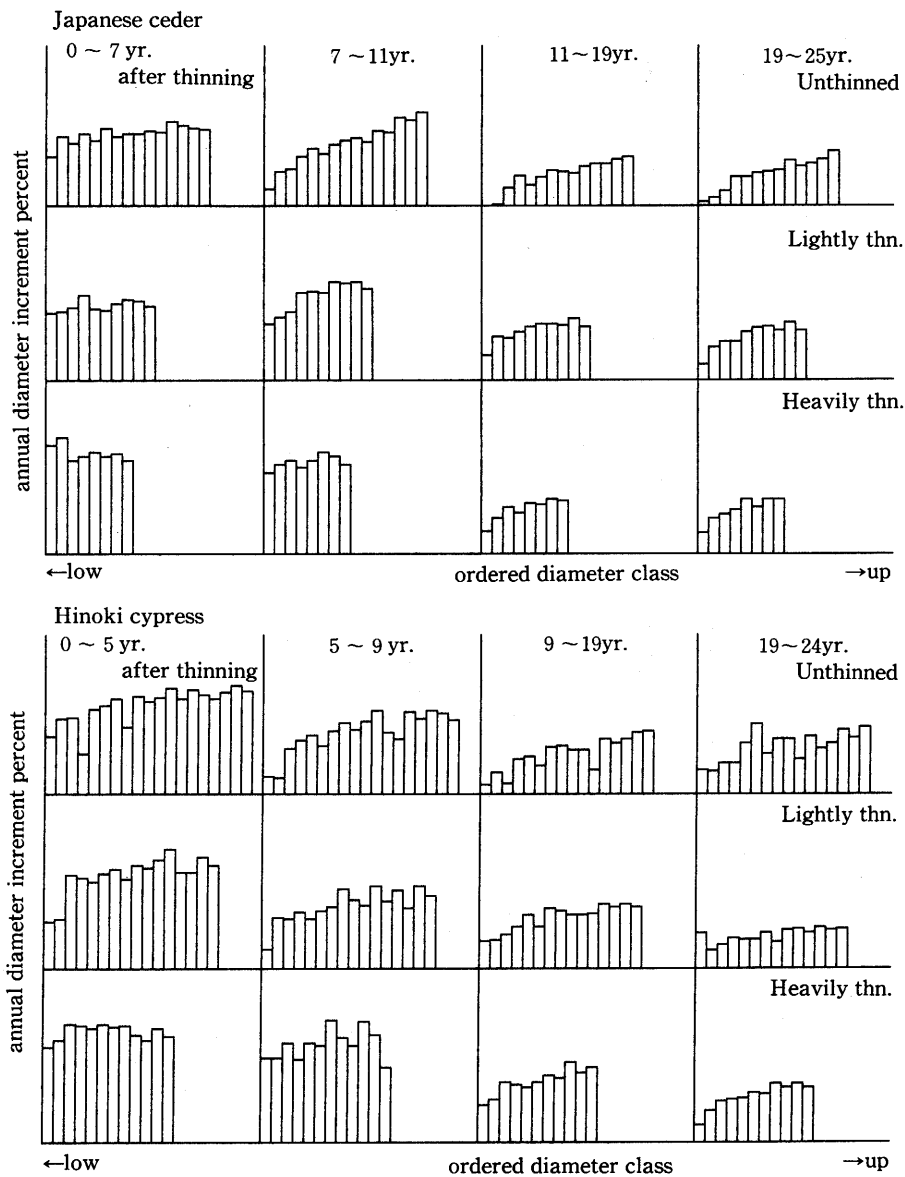


図一 2 間伐後の年平均生長率の比較

Fig. 2 Comparison of annual diameter increment percent after thinning

■ : unthinned ▨ : lightly thn. □ : heavily thn.

強度間伐区の林木を期首における直径の順に並べ、各階層の本数が等しくなるように区分し、ライブニツ式により年平均生長率を求めた。階層 5 は、上位 20% のグループを示す。弱度間伐区と無間伐区では、強度間伐区の各階層と同じ直径階にあった林木の年平均生長率を求めた。したがって、弱度間伐区と無間伐区では、各階層の本数は等しくない。スギでは上から順に間伐後 0～7 年目、7～11 年目、11～19 年目、19～25 年目の各測定期間の年平均生長率を示しているヒノキ・サワラ・カラマツでは上から 0～5 年目、5～9 年目、9～19 年目、19～24 年目の各測定期間の年平均生長率を示している。



図一3 直径順位階層ごとの年平均成長率の比較(1)

Fig. 3 Comparison of annual diameter increment percent in each ordered diameter class

注) 各測定期間の期首において直径の小さいものから順に並べ、ha当り100本を一つの直径順位階層 (ordered diameter class) として区分し、ライプニッツ式によって求めた年平均生長率の直径順位による違いを、無間伐 (上段)、弱度間伐 (中段)、強度間伐 (下段) の間で、測定期間ごとに比較したものである。

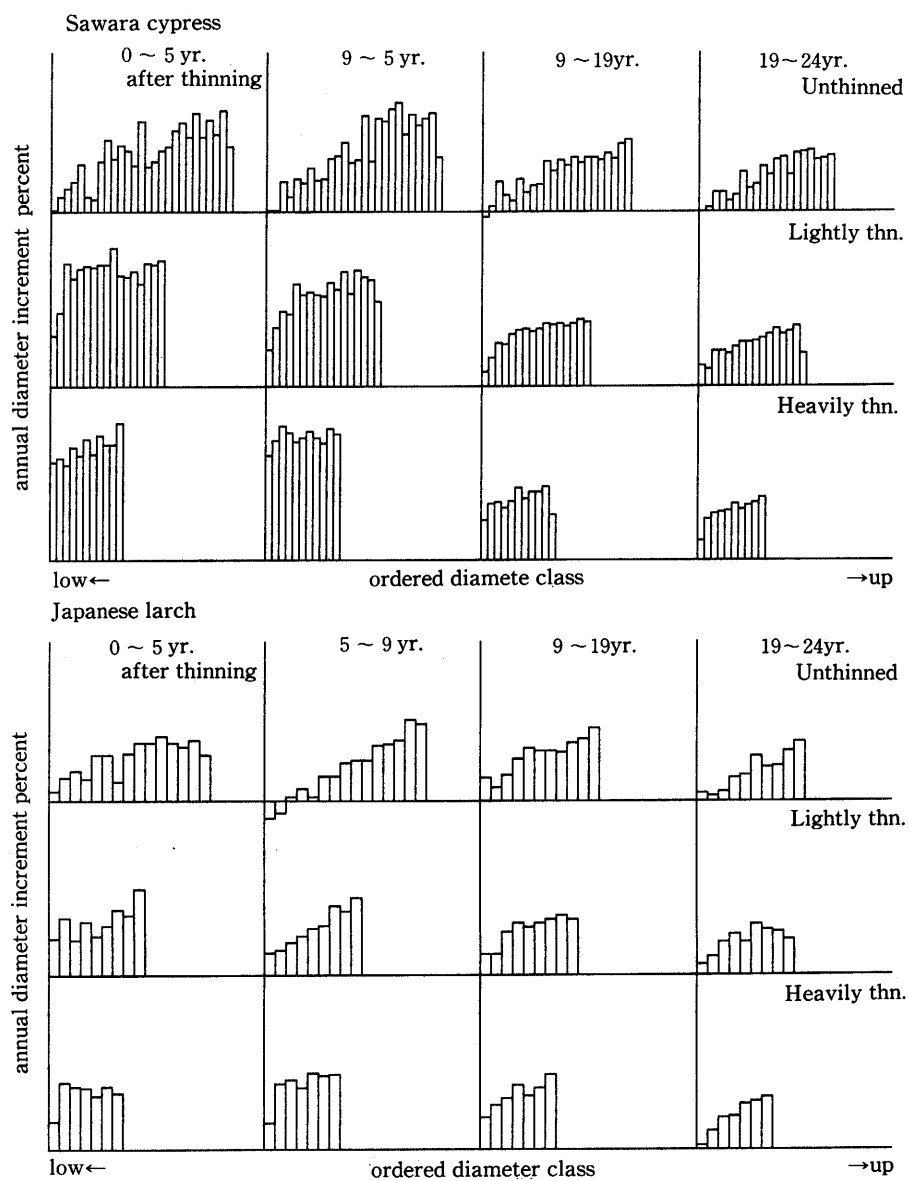
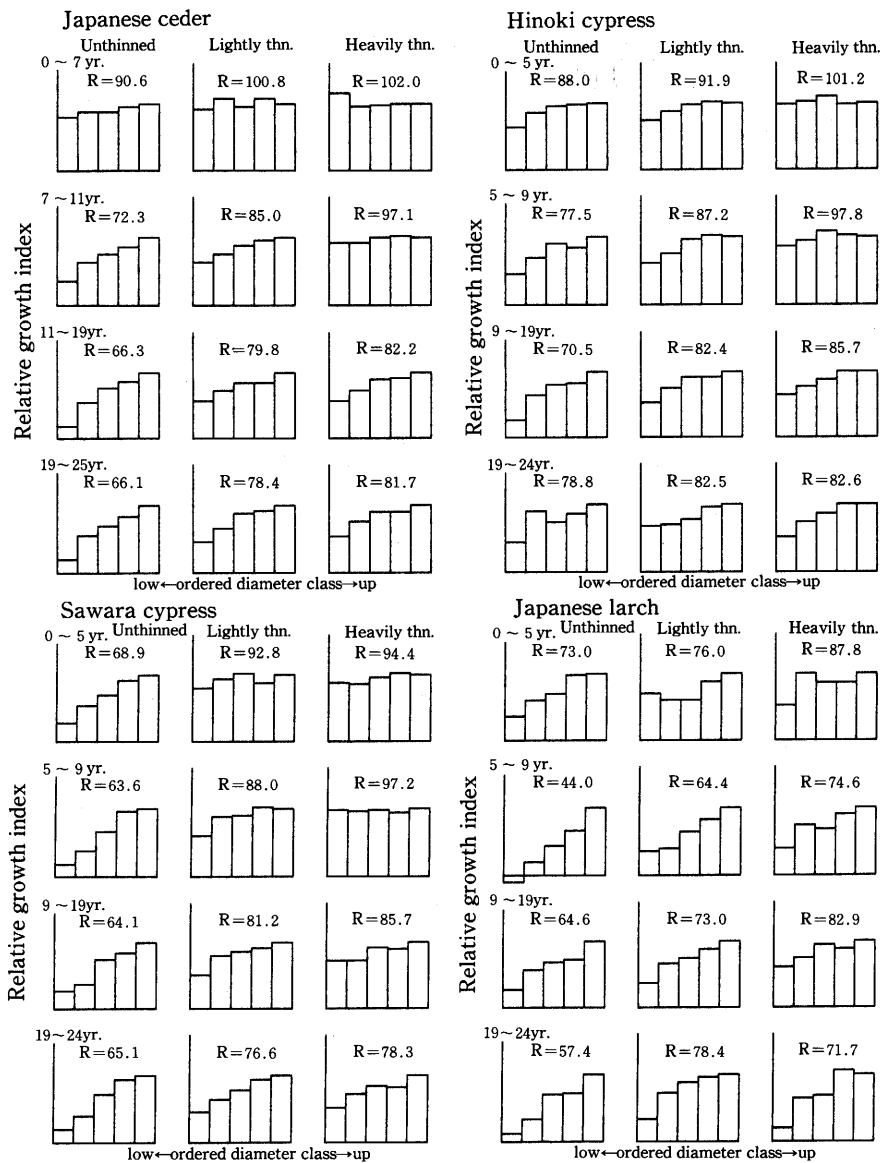


図-3 直径順位階層ごとの年平均生長率の比較(2)

Fig. 3 Comparison of annual diameter increment percent in each ordered diameter class



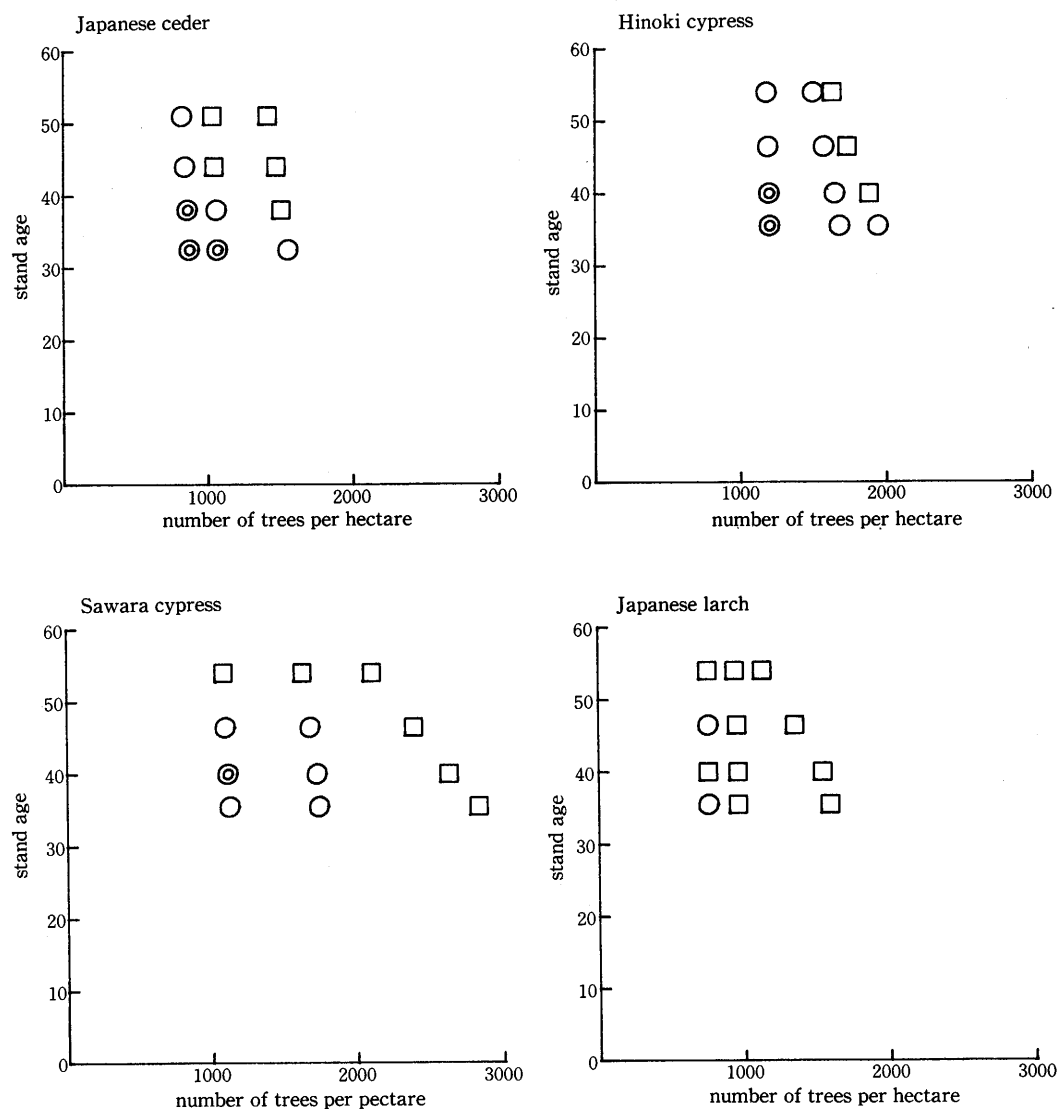
図一 4 相対的生長指数の比較

Fig. 4 Comparison of the relative growth index

注) 各測定期間の期首における上位20%の林木の生長率を100として、他の各20%の直径順位階層の生長率を相対的に示したものである。

Rは相対的生長指数で5つのグループの相対値の平均値である。

図一5は、相対的生長指数と林齢・本数密度の関係を示したものである。この図から、同一林齢では本数密度が高いほど相対的生長指数の値が小さくなり、同一本数密度では林齢が高いほど相対的生長指数の値が小さくなることがわかる。

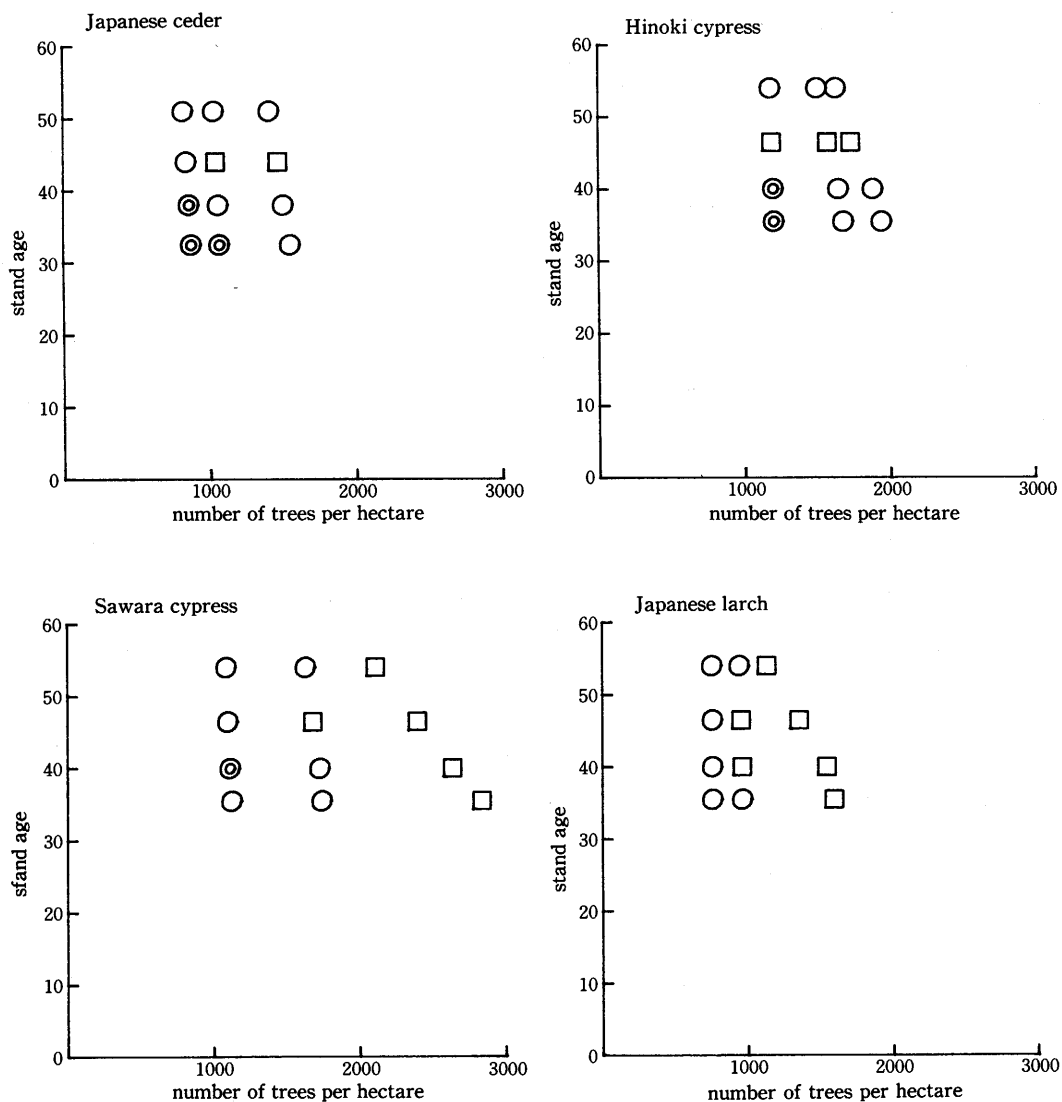


図一5 相対的生長指数と本数密度の関係

Fig. 5 Relationship between the relative growth index and the number of trees per hectare

- 注) ● : Relative growth index > 95  
 ○ :  $95 \geq$  Relative growth index > 80  
 □ :  $80 \geq$  Relative growth index

次に、相対的生長指数と林分の直径分布との関係を見ることにする。図一6は、各林分の二時点間の直径分布の変動係数の増減と林齢・本数密度の関係を表現したものである。相対的生長指数の図と比較してみると、両者の間に一定の関係が認められる。



図一6 変動係数と本数密度の関係

Fig. 6 Relationship between the coefficient of variation of diameter distribution and the number of trees per hectare

注) ◎ : increment of c.v. < 0.05  
 ○ : 0.05 ≤ increment of c.v. < 0.15  
 □ : 0.15 ≤ increment of c.v.



すなわち間伐の結果、直径上位木と下位木との間の直径生長率の差異が小さくなった林分では、相対的生長指数は大きく、直径分布の変動係数の変化は小さい。これに対して、直径下位木の生長率が上位木に対して小さくなる林分では、相対的生長指数は小さくなり、直径分布の変動係数は大きく増加している。

#### IV MITSCHERLICH 式による間伐効果の分析

ここまで林木の生長の指標の一つとして年平均直径生長率を用いてきた。しかし、直径生長率は林齢とともに低下し、各間伐試験地の測定時期は一樣ではないため、測定時期の異なる試験地間の比較をする場合には年平均直径生長率をそのまま利用することができない。そこで、各林木の直径生長を時間  $t$  の関数である生長曲線式によって表現することを検討する。

ここではまず、代表的な生長曲線式、すなわち、MITSCHERLICH 式、GOMPERTZ 式、Logistic 式の 3 つについて比較を行う<sup>3),8)</sup>。

筆者らは東京大学秩父演習林のスギ22本・ヒノキ21本の樹幹解析資料を用いて、デミングの最小二乗法<sup>9)</sup>により間伐の対象となる25年生以上の各年齢における直径生長について、生長曲線式のあてはめを行った<sup>12)</sup>。その結果は表—5 のとおりである。真の値に対する理論値の正確度を尺度に、あてはめの結果を評価すると、ヒノキの場合、MITSCHERLICH 式、GOMPERTZ 式、Logistic 式の順となる。これに対して、スギの場合、この順序は逆転する。しかし、その差異はスギで0.09cm、ヒノキで0.06cmとごく小さな値である。このことから、この3つの生長曲線は幼齢期においては、それぞれ独特な生長パターンを表現しているが、壮齢期においては、

表—5 MITSCHERLICH, GOMPERTZ および Logistic 式の25年生以上の直径生長へのあてはめの適合性の比較

Table 5 Comparison of goodness of fit among MITSCHERLICH, GOMPERTZ and Logistic equation to diameter growth curve above 25 yr.

生長曲線式 growth equation	誤差の平均値 $\sum_{i=1}^N \{ \sum_{j=1}^n  Y_{ij} - y_{ij}  / n \} / N$ (cm)		誤差率の平均値 $\sum_{i=1}^N \{ \sum_{j=1}^n  Y_{ij} - y_{ij}  / y_{ij} \cdot n \} / N$ (%)	
	lapanese cedar	Hinoki cypress	Japanese cedar	Hinoki cypress
MITSCHERLICH	0.092	0.052	0.399	0.346
GOMPERTZ	0.087	0.055	0.369	0.363
Logistic	0.083	0.058	0.349	0.387
MITSCHERLICH (parameter L fix to 1)	0.151	0.114	0.667	0.799

Y: culcated diameter, y: observed diameter

n: number of data of the  $i$ th tree, N: number of trees

ほぼ同じ形をしているということができる。

このように、壮齡期における直径生長は、3つの生長曲線式のどれを使っても、ほぼ同程度の誤差の範囲内で表現できる。そこで、筆者らは、式の形が最も単純な MITSCHERLICH 式を使って直径生長を表現することにした。

MITSCHERLICH 式によれば、 $t$  年生時における胸高直径  $D(t)$  は、3つの係数  $M$ ,  $L$ ,  $k$  により  $D(t) = M(1 - Le^{-kt})$  と表現される。ここで、 $M$ ,  $L$ ,  $k$  はそれぞれこの生長曲線の極限の値、立上りの時期、曲線の形の指標である。これらのうち係数  $L$  は各標本で特に安定した値をとり、ほぼ 1 に近い。そこで、式を簡単な形にするため係数  $L$  を 1 とすれば  $D(t) = M(1 - e^{-kt})$  と表現できる。これは生長曲線が原点を通過するという意味である。

そこで、筆者らは前述の樹幹解析資料から、係数  $L$  を 1 に固定して、MITSCHERLICH 式のあてはめを行った。その結果、それぞれの測定値と理論値の差異の平均値は、スギで 0.151cm, ヒノキで 0.114cm である。これらの差異は、測定誤差の範囲内であるとみなすことができる。したがって、係数  $L$  を 1 に固定した MITSCHERLICH 式  $D = M(1 - e^{-kt})$  は単木の年齢 25 年生以上における直径生長を表現するのに有効な手段であるといえる。

### 1 係数 $k$ と直径生長率の関係

そこで、各試験地間の測定時期の違いを解消して間伐の影響を比較するために、各林木の直径生長を MITSCHERLICH 式によって表現することにする。ところで、MITSCHERLICH 式の係数  $k$  と直径生長率  $P$  の間には次のような関係式が成り立ち図-7 になる。

$$\begin{aligned} P &= \frac{D(t+1) - D(t)}{D(t)} = \frac{M(1 - e^{-k(t+1)})}{M(1 - e^{-kt})} \\ &- 1 = \frac{(1 - e^{-k})e^{-kt}}{(e^{kt} - 1)e^{-kt}} \\ &= \frac{1 - e^{-k}}{-(1 - e^{-kt})} \end{aligned}$$

$P$ ,  $k$ ,  $t$  の関係は、 $k$  が減少すると  $P$  が増加し、 $t$  が増加するにつれ  $P$  は単調に減少する。したがって  $t$  年生における  $P$  は  $M$  の大きさのいかんにかかわらず  $k$  の大きさによって決まる。このことはこれまでみてきたことと一致する。そこで

MITSCHERLICH 式の係数  $k$  を壮齡期における直径生長率の指標として注目してみることに

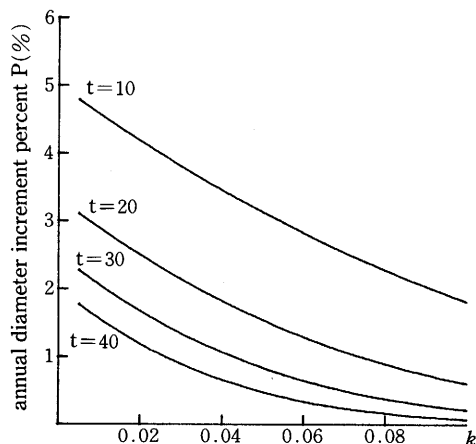


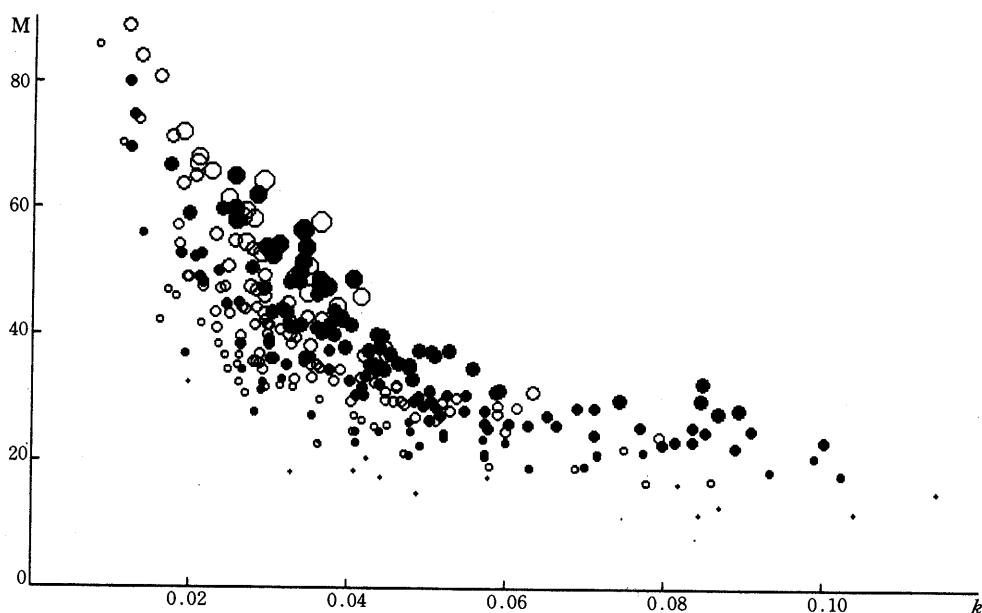
図-7 MITSCHERLICH 式の係数  $k$  と年生長率  $P$  の関係

Fig. 7 Relationship between the parameter  $k$  of the MITSCHERLICH equation and annual diameter increment percent  $P$

における直径生長率の指標として注目してみることにする。

## 2 係数 $k$ と $M$ の関係

MITSCHERLICH 式のもう一つの係数  $M$  は、時間無限大における直径の極限值  $D(\infty)$  として考えることができる。そこで、両者の関係を見るために、間伐試験地の林木のうち枯損していない3439本を対象に、直径生長に MITSCHERLICH 式をあてはめ、単木ごとに係数  $M$ ,  $k$  を求めた。縦軸に  $M$ , 横軸に  $k$  をとって各林木の  $k$  と  $M$  の値をプロットしていくと、それらが一



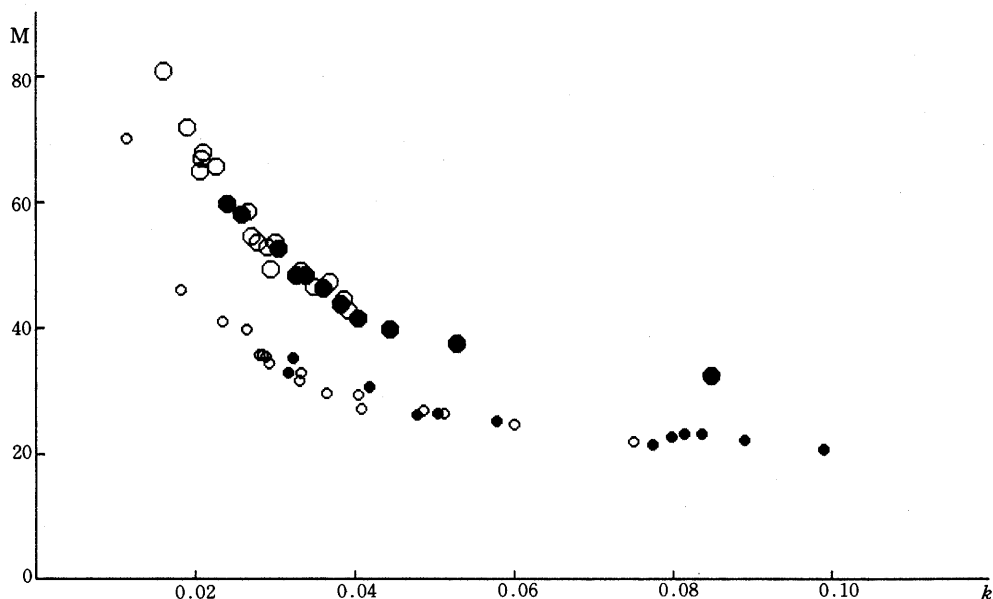
図—8 MITSCHERLICH式の係数 $M$ と $k$ の分布

Fig. 8 Distribution of the parameters  $M$  and  $k$  of the MITSCHERLICH equation

注) ● : unthinned

○ : thinned

Radius of circle is in proportion to diameter at thinning



図一 9 間伐時において胸高直径が20cmと30cmであった林木のMITSCHERLICH式の係数Mと $k$ の分布

Fig. 9 Distribution of the parameters M and  $k$  of the MITSCHERLICH equation of trees with 20cm and 30cm of diameter at thinning

● : Unthinned ○ : Thinned

Radius of circle is in proportion to diameter at thinning

定の傾向をもって分布することがわかった。その一例をスギについて示すと図一 8 のようになる。これをみると、 $k$  の値が大きい木はMの値が小さくなっている。これは直径生長率の低い木では生長極限值が小さいことを示している。また、間伐区の方が無間伐区よりも左上に多く分布していることがわかる。

図一 9 は、図一 8 から間伐時の直径階が20cmと30cmにあった林木だけを取り出したものである。これをみるとMと $k$ が間伐時の直径階ごとに特定の曲線上に分布していることがわかる。そして、間伐区の○が無間伐区の●に比べて、相対的に左上方に分布していることもわかる。

ここで、間伐による生長促進効果によって $k$ の値が小さくなる時、生長曲線がどのように変化するかを考えてみる。時間 $t$ と胸高直径 $D$ の間に $D = M(1 - e^{-kt})$ の関係があるときに、Mと $k$ の間には $M = D/(1 - e^{-kt})$ が成り立ち、図一10の曲線のようになる。したがって、ある時点 $t$ に胸高直径 $D$ の林木は、生長曲線式の係数Mと $k$ の値が $M = D/(1 - e^{-kt})$ という関係式で表現される曲線上にあることになる。

このことから、間伐時 $t$ に同じ直径階 $D$ にあった林木の生長曲線式の係数 $k$ の値が、間伐に

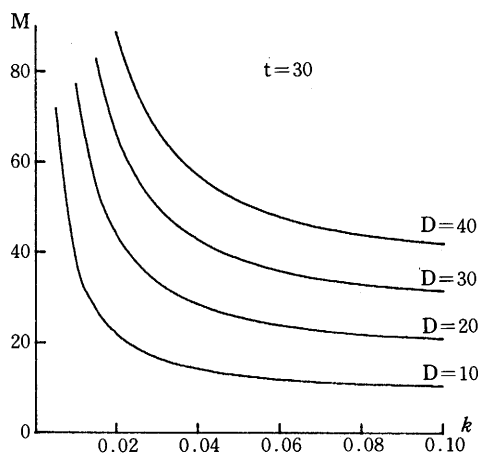


図-10 年齢  $t$  と胸高直径  $D$  を固定したときの MITSCHERLICH 式の係数  $M$  と  $k$  の関係

Fig. 10 Relationship between the parameter  $M$  and  $k$  of the MITSCHERLICH equation with the fixed value of age  $t$  and diameter  $D$

注)  $t$  : age at thinning

$D$  : diameter at thinning

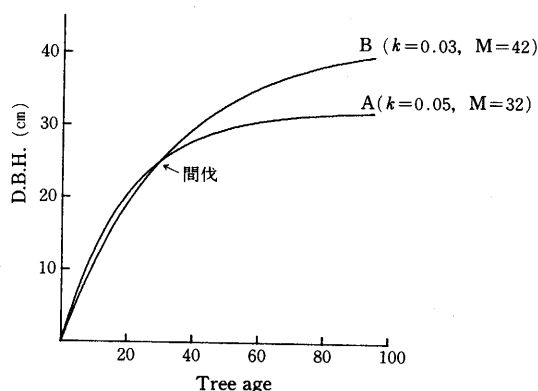


図-11 MITSCHERLICH 式の係数  $M$  と  $k$  の変化による生長曲線の乗り換え

Fig. 11 Transfer the growth curve by the change of the parameters  $M$  and  $k$  of the MITSCHERLICH equation

$t=30$  のときに、 $D=25$  の林木は、間伐によって  $k$  の値が  $0.05$  から  $0.03$  に減少して、生長曲線  $A$  から  $B$  に乗り換える。

よる生長促進効果によって減少し、 $M=D/(1-e^{-kt})$  の曲線上を右下から左上に移動しているといえる。この  $k$  の変化を生長曲線上で表現すれば、図-11のようになる。時間  $t$ 、胸高直径  $D$  の点における間伐の結果、生長曲線を  $A$  から  $B$  に乗り換えるものと考えることができる<sup>11)</sup>。

### 3 係数 $k$ の平均値と本数密度の関係

図-12は各間伐試験区における係数  $k$  の  $ha$  当りの頻度分布である。この図から間伐区では無間伐区と比較して係数  $k$  の頻度分布が値の小さい方にシフトしていることが分かる。また、間伐の強度によってシフトの度合も異なっている。しかし、カラマツでは間伐区と無間伐区の間係数  $k$  の頻度分布の差異は認められない。

無間伐区における係数  $k$  の頻度分布をみると、それぞれの樹種ごとに特定のパターンがあり、ヒノキ・サワラのほうがスギ・カラマツよりも頻度分布が値の小さい方に偏り、無間伐状態でも比較的高い生長率を保っていることがわかる。図-13は係数  $k$  の平均値と本数密度の関係を表現したものであるが、本数密度が低いほど係数  $k$  の平均値は小さくなり生長率の平均値は大きくなっている。また、ヒノキ・サワラのほうがスギ・カラマツに対して同じ本数密度で

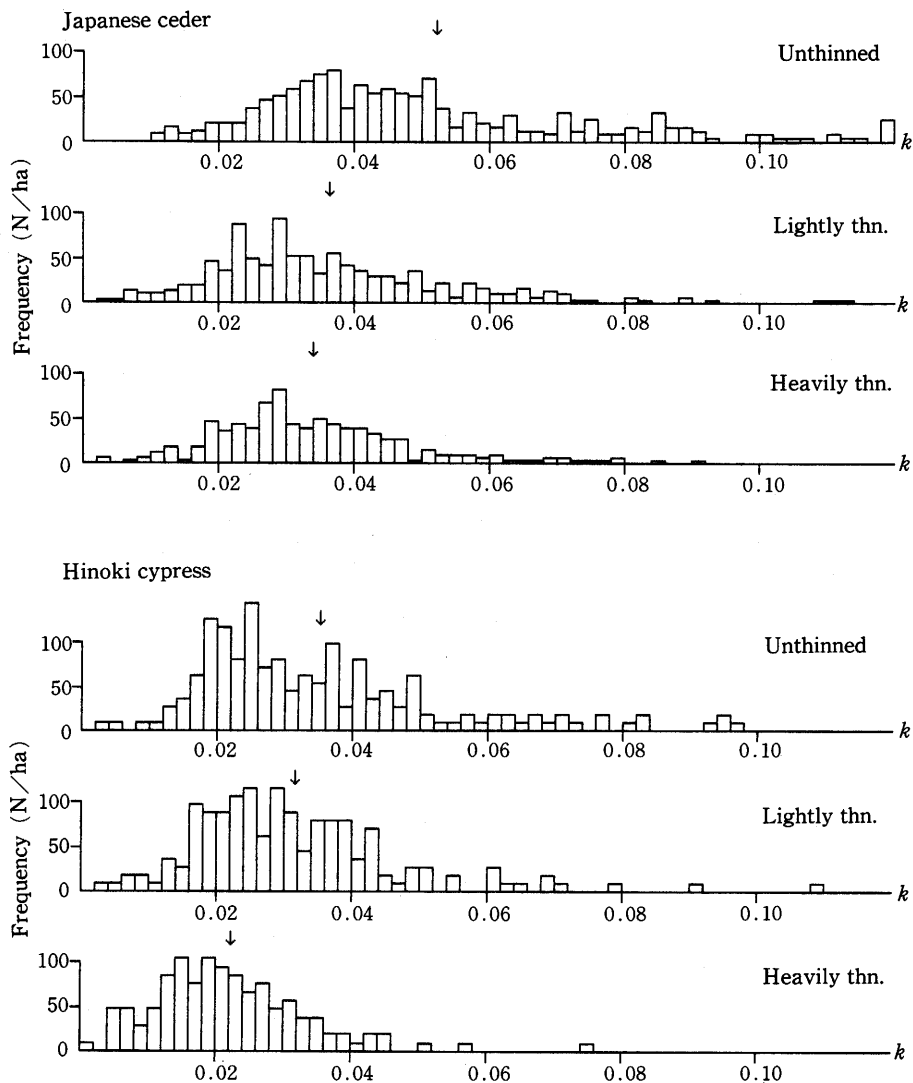


図-12 MITSCHERLICH式の係数 $k$ の頻度分布(1)

Fig. 12 Frequency distribution of the parameters  $k$  of the MITSCHERLICH equation

↓は平均値の位置を示す

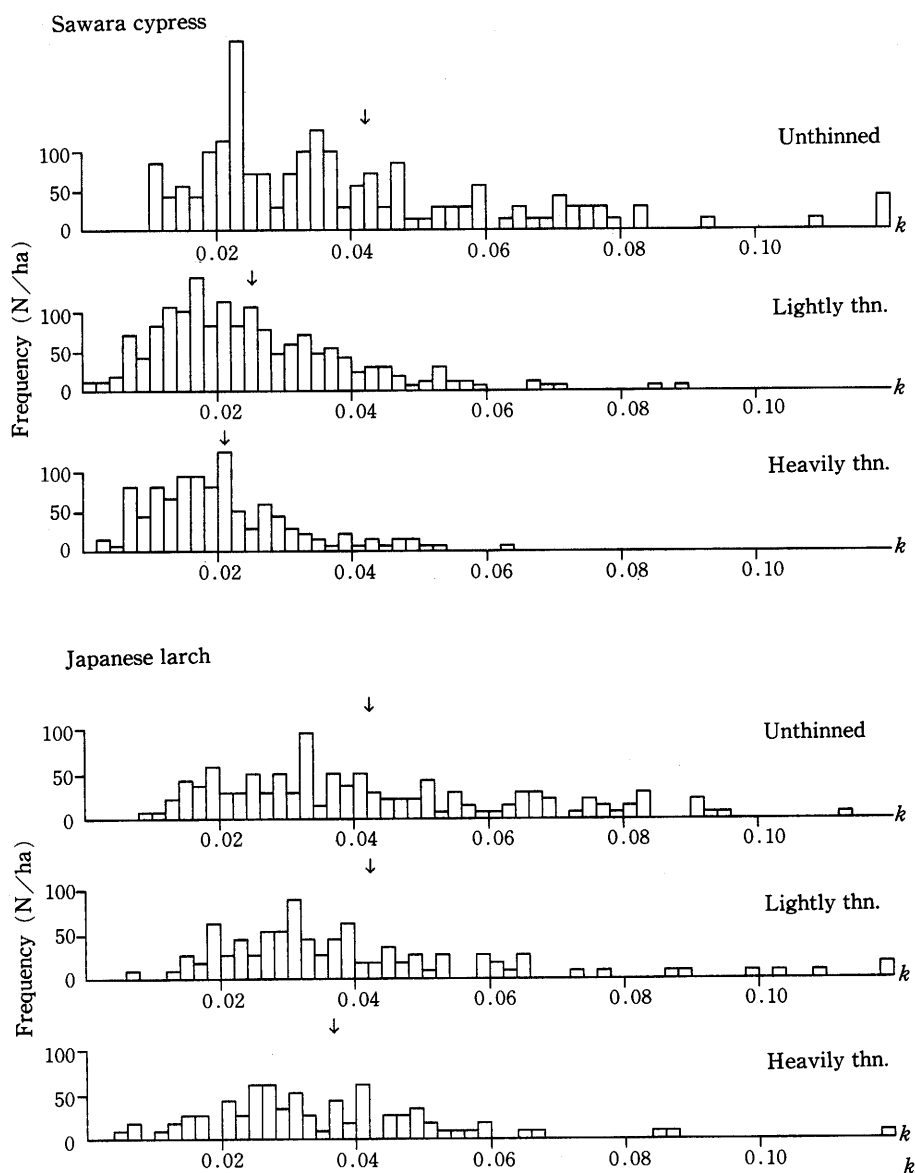


図-12 MITSCHERLICH式の係数 $k$ の頻度分布(2)

Fig. 12 Frequency distribution of the parameters  $k$  of the MITSCHERLICH equation

も係数  $k$  の平均値は小さく、分散は小さくなっている。このことは、ヒノキ・サワラのほうが生長率の平均値が高く、そのばらつきが小さいことを示している。

#### 4 係数 $k$ と直径階層の関係

各直径階層のうちで、どの直径階層が間伐の影響を大きく受けているかを、MITSCHERLICH 式の係数  $k$  の値を指標に比較する。

図-14は、強度間伐区の林木を間伐時における胸高直径の大ききの順に並べ換えて、各階層の本数が等しくなるように区分し、階層ごとに間伐時に同じ直径階にある無間伐区・弱度間伐区の林木の係数  $k$  の頻度分布と対比したものである。

MITSCHERLICH 式の係数  $k$  の直径階層ごとの分布の状態から、直径上位木には係数  $k$  の値が大きいもの、すなわち、生長不良の木が少なく、直径順位が下がるにしたがって、生長不良木の割合がふえる傾向が認められる。間伐によって、この生長不良木の割合が小さくなっているが、その小さくなる程度は、樹種および間伐強度により異なる。

スギの場合、無間伐区の下位木では生長不良木の割合が非常に高い。弱度間伐の結果、無間伐区と比較してまずその影響が現れるのは中位木である。そして、間伐の強度を高めるにしたがって上位木・下位木に間伐の影響は広がっていくが、下位木における変化の方がより顕著である。

ヒノキでは、無間伐区の下位木での生長不良木の割合がスギに比べて低く、下位木と上位木との間の係数  $k$  の差異は、比較的小さい。間伐の影響の現れ方はスギと同様に、間伐の強度に応じて中位木から広がるが、下位木での影響の現れ方はスギよりも著しい。

サワラもヒノキと同様に、無間伐区の下位木での生長不良木の割合がスギに比べて低く、下位木と上位木との間の係数  $k$  の差異は、比較的小さい。間伐の影響の現れ方は、各階層にわたりスギよりも顕著である。

カラマツは、無間伐区の下位木での生長不良木の割合が高く、下位木と上位木との間の係数  $k$  の差異は非常に大きい。また間

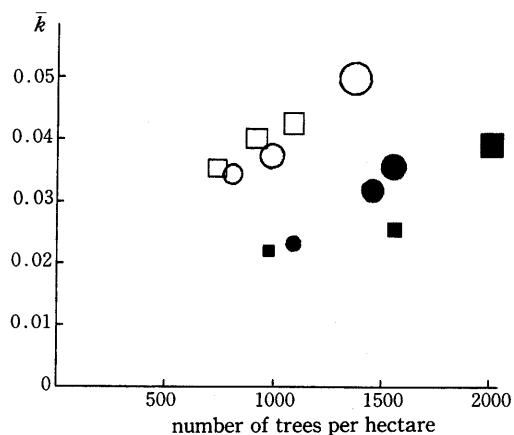


図-13 MITSCHERLICH 式の係数  $k$  の平均値と本数密度の関係

Fig. 13 Relationship between the mean of the parameters  $k$  of the MITSCHERLICH equation and the number of trees per hectare

- : Japanese cedar
- : Hinoki cypress
- : Sawara Cypress
- : Japanese larch

図形の大きさは、 $k$  の分散の値を示す



伐に対する反応も鈍く、かなり強度な間伐によっても上位木・下位木に間伐の影響は現れていない。

## V 林分としての間伐効果の比較

### 1 間伐による大径木生産本数の比較

間伐の目的をより多くの大径木生産に求める場合、間伐によって各林木の平均直径生長率は向上するが、全体の本数も減少する。したがって、間伐による大径木生産効果は、一定面積からどれだけ多くの大径木が得られるかを比較することが必要である。

そこで、実際の生長測定結果から、各測定時点における単位面積内の一定径級以上の立木本数を、樹種と間伐強度ごとに比較した（表－6）。

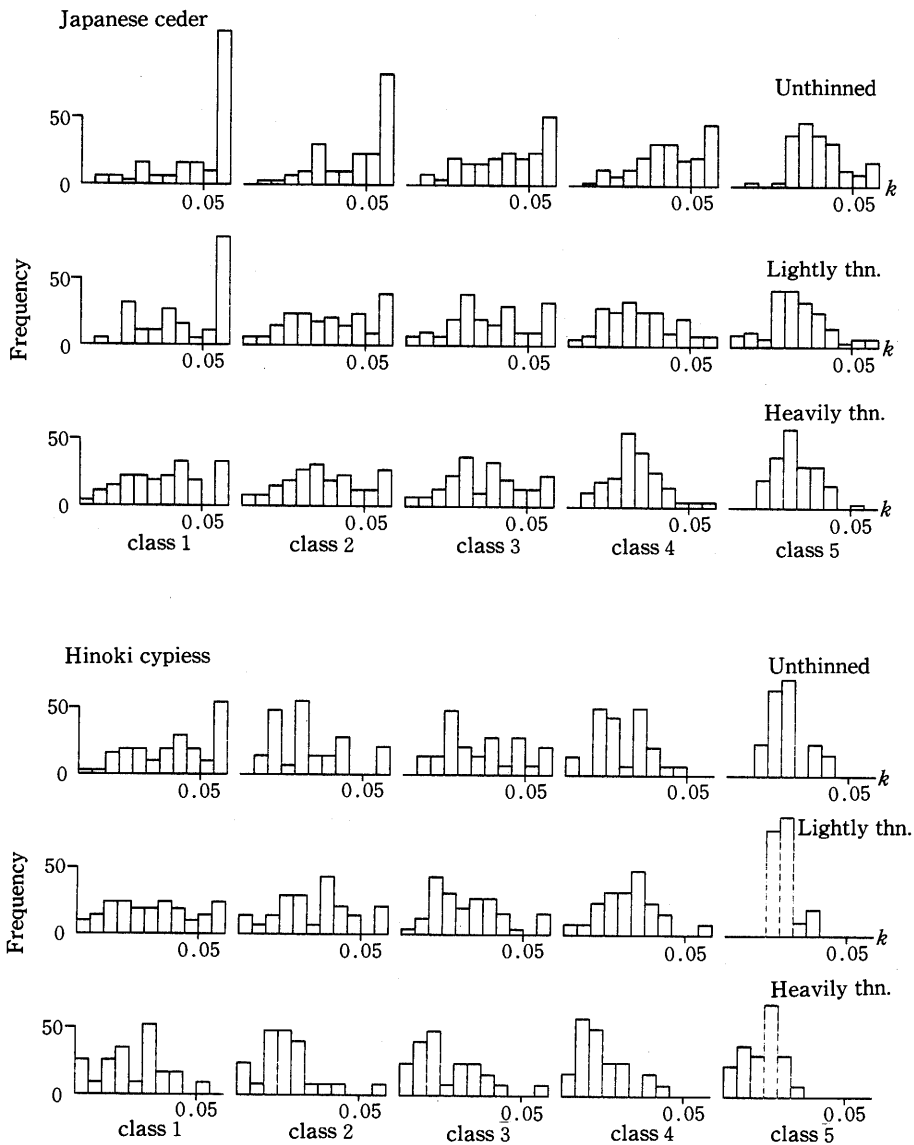
スギの強度間伐区においては全体の本数を少なくしすぎたため、個々の林木の生長は促進されても、林分としての大径木生産効果は得られていない。また、カラマツについても上位木の生長に差異がないため、大径木は全体の本数の多い無間伐区のほうが多いという結果になっている。しかし、その他のスギの弱度間伐区、ヒノキ・サワラの強度間伐区においては大径木生産効果がみられる。

樹種による大径木生産効果の現れ方の違いをみると、スギよりもヒノキ・サワラのほうが、大径木生産効果の現れ方が顕著である。例えば、スギの54年生時では44cm以上の大径木の本数は無間伐区のほうが多く、38cm以上でも弱度間伐区の本数は無間伐区の1.05倍でしかない。これに対して、ヒノキの強度間伐区では57年生時の34cm以上の本数が無間伐区の2.11倍もある。また、サワラの強度間伐区では57年生時の34cm以上の本数が無間伐区の2.16倍ある。

次に、MITSCHERLICH 式の係数 $M$ の値を用いて、将来の大径木生産の予測をすることにする。先にも述べたとおり、MITSCHERLICH 式の係数 $k$ は直径生長率の指標である。これに対してもう一方の係数 $M$ は、時間無限大における直径の極限值 $D(\infty)$ として考えることができる。そして、両者の間には $k$ の値が小さくなれば $M$ の値が大きくなるという関係が成り立つ。

図－15は各間伐区における MITSCHERLICH 式の係数 $M$ の頻度分布である。これをみると係数 $k$ の場合とは逆に、間伐の結果、分布が値の大きい方に動いていることがわかる。これは間伐による生長促進効果によって、各林木の時間無限大における直径の極限值 $D(\infty)$ の値が増加していることを示している。

そこで、 $M$ の値が80以上、70以上、60以上、50以上、40以上の林木がそれぞれ何本あるかを $ha$  当たり換算して求めたのが表－7である。各樹種とも、間伐区のほうが大きな $M$ の値を持つ木の本数が多い。そして、 $M$ の値が下がるにつれてその差異は小さくなっている。これは間伐区のほうが全体の本数が少ないからである。

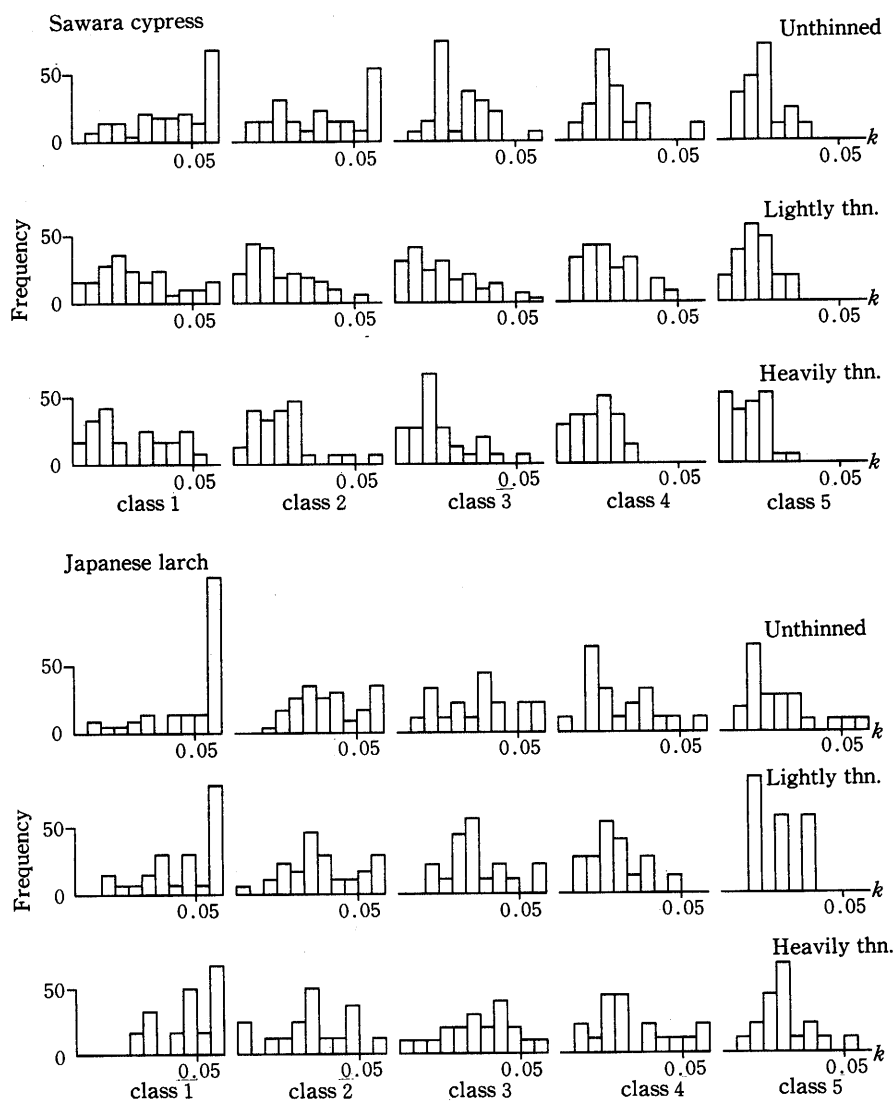


図一14 直径階層ごとの係数 $k$ の頻度分布(1)

Fig. 14 Frequency distribution of the parameters  $k$  of the MITSCHERLICH equation in each diameter class

注) 強度間伐区の林木を間伐時の直径の順に並べ、各階層(class)の本数が等しくなるように区分し、各階層ごとに係数 $k$ の頻度分布を示す。class 5は上位20%のグループを示す。弱度間伐区と無間伐区では強度間伐区の各classと同じ直径階にあった林分の係数 $k$ の頻度分布を示す。

なお、ここでは対比しやすくするために各classの本数が200本になるように調整されている。



図一14 直径階層ごとの係数 $k$ の頻度分布(2)

Fig. 14 Frequency distribution of the parameters  $k$  of the MITSCHERLICH equation in each diameter class

表一 6 単位面積あたりの大径木本数の比較

Table 6 Comparison of the number of the large-sized trees per hectare

樹 種 Species	間伐強度 Degree of thinning	大 径 木 本 数			Number of the large-sized trees per hectare					
		42(40) years old			51(48) years old			57(54) years old		
		34 >(44)cm	28 >(38)cm	22 >(32)cm	34 >(44)cm	28 >(38)cm	22 >(32)cm	34 >(44)cm	28 >(38)cm	22 >(32)cm
Japanese cedar										
	Heavily thn.	18	80	271	29	156	383	77	221	436
	Lightly thn.	3	76	332	49	174	489	82	269	578
	Unthinned	4	109	402	38	180	532	88	256	595
Hinoki cypress										
	Heavily thn.	0	114	351	114	323	636	190	474	731
	Lightly thn.	0	62	267	18	204	569	80	267	720
	Unthinned	0	54	325	9	181	552	90	344	669
Sawara cypress										
	Heavily thn.	7	110	382	88	294	574	184	390	640
	Lightly thn.	0	18	192	6	174	450	72	246	635
	Unthinned	0	28	256	14	199	484	85	242	626
Japanese larch										
	Heavily thn.	0	0	79	0	53	228	0	97	281
	Lightly thn.	0	0	9	0	0	117	0	36	189
	Unthinned	0	15	88	22	59	206	22	118	265

注) >34cmとは胸高直径が34cm以上の立木のha当たり本数を示す

( )内はスギの場合の数値である

これらのことから、長期的な傾向としては、間伐によって一定面積からより多くの大径木が生産されるといえる。

## 2 断面積生長量の比較

ここまで、直径階ごとの直径生長率や一定径級以上の立木本数の比較を行ってきたが、それでは、林分全体の生長量は間伐によってどのような影響を受けているのかを、胸高断面積合計を指標にとって、間伐区と無間伐区の比較を行うことによって調べる。林分の生産量は、通常、材積によって示されるが、隣接した地位の同等な林分では平均樹高もほぼ同じであるとみなすことができるので、ここではより精度の高い胸高断面積合計の値によって林分の生産量を表現する。

表一 8 は間伐後の測定期間ごとに、当該測定期間中の枯損木を除いた全林木の断面積生長量を求め、ha 当りの年平均生長量とその累計を示したものである。

その結果、各林分の間伐後の断面積生長量は無間伐区と間伐区とではほぼ等しいことが認められた。しかし、スギの強度間伐区とカラマツの間伐区において、断面積生長量が無間伐区と比較してかなり小さな値となった。

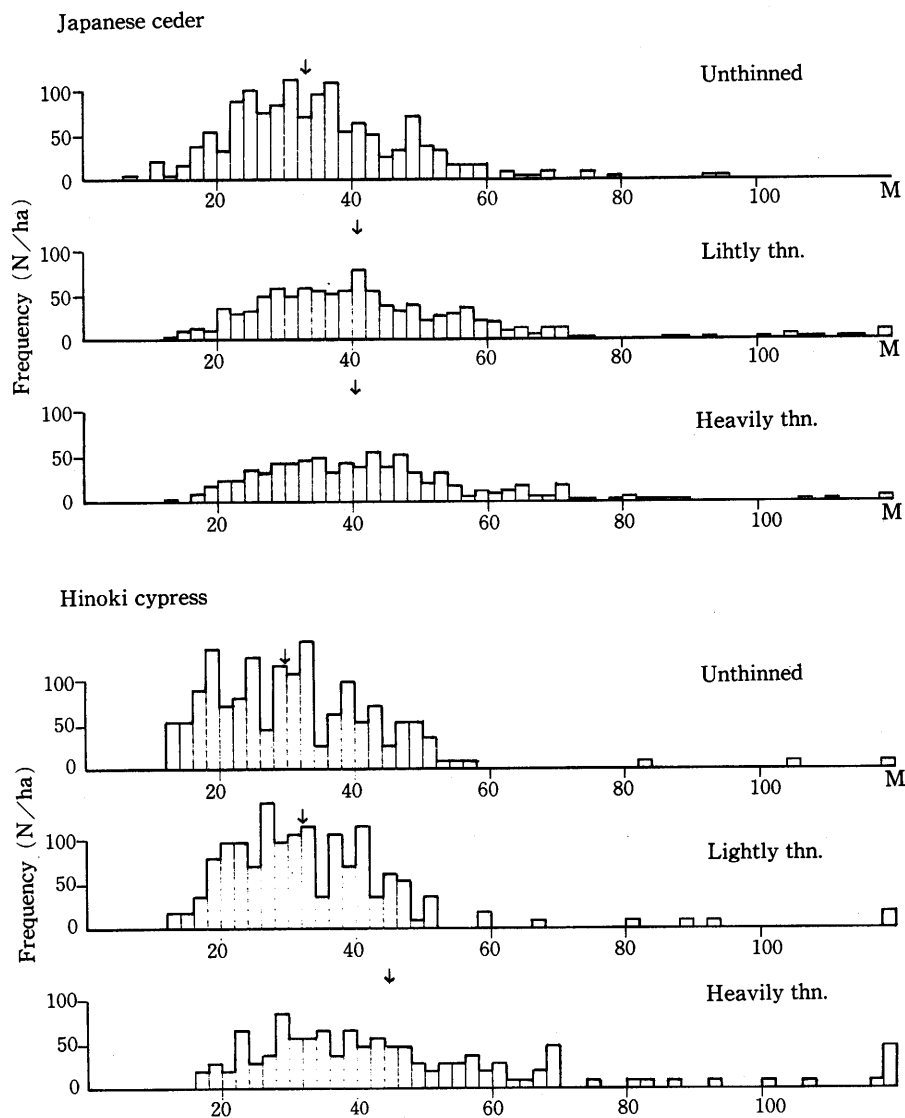


図-15 MITSCHERLICH式の係数Mの頻度分布(1)

Fig. 15 Frequency distribution of the parameters M of the MITSCHERLICH equation

注) ↓は平均値の位置を示す。

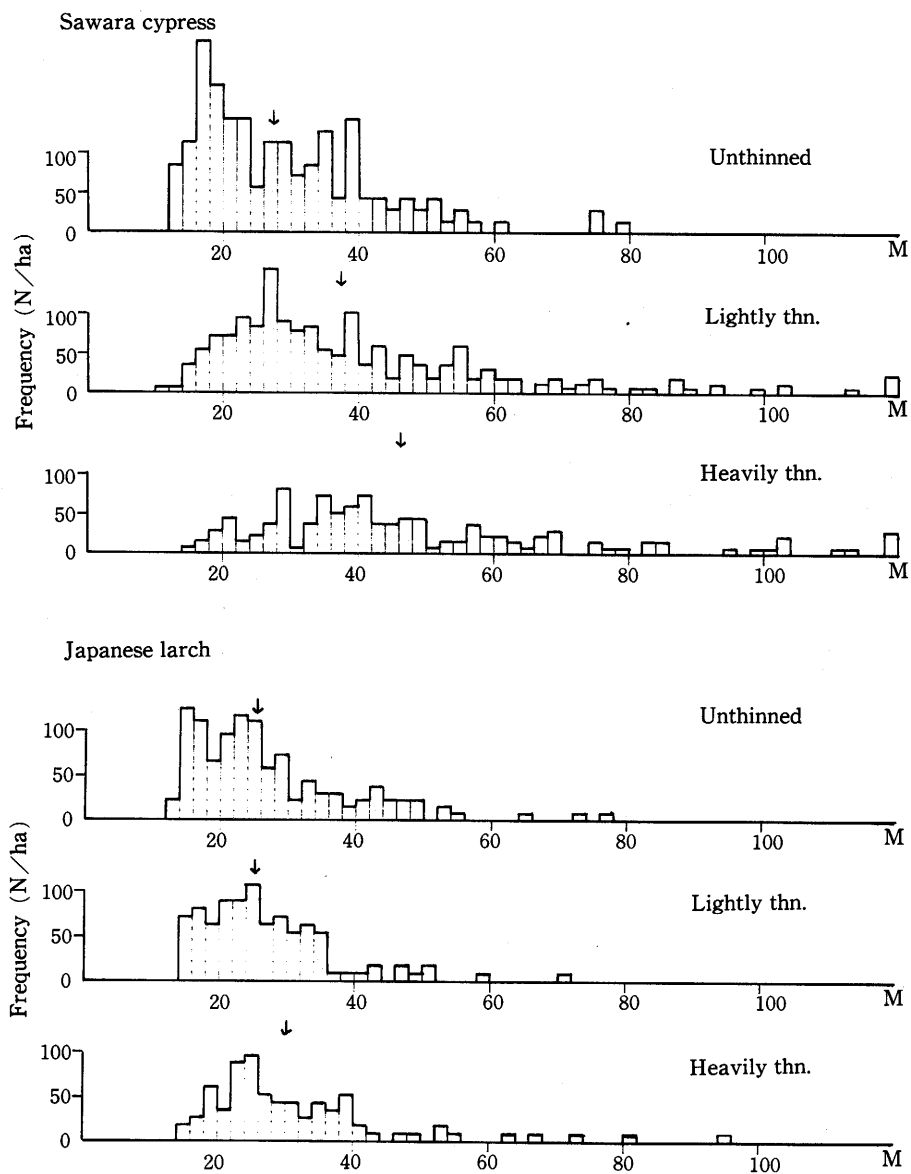


図-15 MITSCHERLICH式の係数Mの頻度分布(2)

Fig. 15 Frequency distribution of the parameters M of the MITSCHERLICH equation

表-7 MITSCHERLICH式の係数Mによる大径木生産効果の比較

Table 7 Examination of the effects on the large-sized tree growth based on the parameter M of the MITSCHERLICH equation

樹種 Species	間伐強度 Degree of thinning	本数 Number of trees per hectare				
		M>80	M>70	M>60	M>50	M>40
Japanese cedar						
	Heavily thn.	29	56	106	195	413
	Lightly thn.	43	62	125	263	509
	Unthinned	8	21	46	168	411
Hinoki cypress						
	Heavily thn.	114	123	237	370	598
	Lightly thn.	44	44	53	107	382
	Unthinned	27	27	27	90	353
Sawara cypress						
	Heavily thn.	118	147	243	338	574
	Lightly thn.	96	138	204	366	564
	Unthinned	0	43	57	156	341
Japanese larch						
	Heavily thn.	18	26	44	70	114
	Lightly thn.	0	9	9	36	90
	Unthinned	0	15	22	44	169

表-8 胸高断面積の年平均生長量及び累計

Table 8 Mean annual increment and accumulated increment of the basal area

樹種 Species	間伐強度 Degree of thinning	間伐後の年数 Number of years after thinning (yr)	測定間隔 Interval of measurement (yr)	年平均生長量 Mean annual increment (m <sup>2</sup> /ha/yr)	生長量累計 Accumulated increment (m <sup>2</sup> /ha)
Japanese cedar					
	Heavily thn.	0 ~ 3	3	1.974	5.923
		3 ~ 7	4	1.412	11.570
		7 ~ 11	4	1.849	18.965
		11 ~ 19	8	1.069	27.515
		19 ~ 25	6	1.195	34.682
	Lightly thn.	0 ~ 3	3	1.640	4.920
		3 ~ 7	4	1.467	10.786
		7 ~ 11	4	2.183	19.517
		11 ~ 19	8	1.549	31.911
		19 ~ 25	6	1.589	41.448
	Unthinned	0 ~ 3	3	2.089	6.267
		3 ~ 7	4	1.943	14.037
		7 ~ 11	4	2.135	22.577
		11 ~ 19	8	1.228	32.405
		19 ~ 25	6	1.427	40.969

Hinoki cypress						
Heavily thn.						
	0	~	5	5	1.653	8.265
	5	~	9	4	1.779	15.383
	9	~	19	10	1.268	28.070
	19	~	24	5	1.529	35.716
Lightly thn.						
	0	~	5	5	1.755	8.775
	5	~	9	4	1.405	14.394
	9	~	19	10	1.169	26.085
	19	~	24	5	1.164	31.906
Unthinned						
	0	~	5	5	1.773	8.866
	5	~	9	4	1.481	14.792
	9	~	19	10	0.971	24.498
	19	~	24	5	1.642	32.710
Sawara cypress						
Heavily thn.						
	0	~	5	5	1.503	7.516
	5	~	9	4	1.966	15.379
	9	~	19	10	1.140	26.784
	19	~	24	5	1.505	34.309
Lightly thn.						
	0	~	5	5	1.880	9.401
	5	~	9	4	1.885	16.940
	9	~	19	10	1.226	29.196
	19	~	24	5	1.554	36.963
Unthinned						
	0	~	5	5	1.552	7.762
	5	~	9	4	1.908	15.394
	9	~	19	10	1.164	27.029
	19	~	24	5	1.565	34.856
Japanese larch						
Heavily thn.						
	0	~	5	5	0.499	2.495
	5	~	9	4	0.678	5.205
	9	~	19	10	0.551	10.717
	19	~	24	5	0.572	13.578
Lightly thn.						
	0	~	5	5	0.522	2.609
	5	~	9	4	0.546	4.793
	9	~	19	10	0.536	10.150
	19	~	24	5	0.620	13.248
Unthinned						
	0	~	5	5	0.658	3.289
	5	~	9	4	0.670	5.969
	9	~	19	10	0.670	12.674
	19	~	24	5	0.705	16.197

### 3 長径級別丸太生産量の比較

現実的な林業経営の立場に立つならば、林分から生産される丸太の量およびその長径級別内訳について間伐の影響を調べておく必要がある。そこで、樹幹解析資料から得られた相対幹曲線式を使って、各試験区からの丸太の生産量を長径級別に推定することにする。

東京大学秩父演習林の樹幹解析資料から得られるスギ・ヒノキの相対幹曲線式と各試験地ご



とに得られる樹高曲線式をもとにして、次のような方法によって胸高直径から任意の長さの丸太の末口径を求めることができる<sup>2)</sup>。

まず、間伐試験地において、適合度の高かったネスルンドの樹高曲線式  $H(d) = 1.2 + d^2 / (a + b * d)^2$  に各試験地ごとに求められる係数  $a$ ,  $b$  を与え、胸高直径  $d$  の林木の樹高  $H$  を計算する。そして、各樹種の年齢階ごとに係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  を定めた相対幹曲線式<sup>16)</sup>  $y = ax + bx^2 + cx^3$  に任意の相対高  $x$  を与え、相対直径  $y$  を求める。この相対直径  $y$  に、梢端より樹高の9/10の長さだけ離れた位置における直径  $d_0$  を乗じて末口径を求める。

ここでは採材の基準を4 m材におき、末口径8 cm以上の丸太がとれれば、一本の木から何本でも4 mの丸太に採材することにする。そして、末口径が6 cm以下になれば3 m材、3 m材の末口径が6 cm以下になれば2 m材を採材するという方法によって、各間伐試験地から生産可能な丸太の量およびその長径級別内訳を計算する。

その結果は表-9のとおりである。スギの強度間伐区の場合、あまりに強度な間伐をしたため、すべての長径級にわたり生産量が弱度間伐区を下回っている。そこで、弱度間伐区と無間伐区との比較を行うことにする。間伐材を含めた総生産量では常に無間伐区が上回っている。しかも、54年生時における40 cm以上の大径材を除いて、14 cm~18 cmの柱適材、20 cm~28 cmの中目材、30 cm~38 cmの大径材の各径級階においても無間伐区が少しずつ上回っている。このように、スギ林分においては林分から生産される丸太の量および長径級別内訳への間伐の影響は見られなかった。

ヒノキの場合、主伐時の生産量では無間伐区が間伐区を上回っているが、間伐材を含めた総生産量では間伐区が無間伐区を上回っており、間伐区の内でも強度間伐区のほうが総生産量が多い。長径級別内訳をみると30 cm以上の大径材は強度間伐区のほうが多く、57年生時において無間伐区の2.41倍になっている。20 cm~28 cmの中目材はほぼ同量で、14 cm~18 cmの柱適材の割合は無間伐区のほうが多く、57年生時において間伐区の1.40倍になっている。このことは図-16の丸太材積の径級別分布の形をみれば一層明らかである。無間伐区の分布が16 cm~24 cmにわたり高原状を示しているのに対して、強度間伐区の分布は22 cm~26 cmに集中している。このように、ヒノキ林分においては間伐の結果、総生産量が増加するとともに大径材の割合が高くなっている。

サワラの場合にも、ヒノキと同様な間伐の影響が現れており、30 cm以上の大径材は強度間伐区のほうが多く、57年生時において無間伐区の2.52倍になっている。丸太材積の分布の形をみても、強度間伐区のほうが大径材の割合が高くなっている。

## VI 考 察

林木の材積生長量は、外から受け取る太陽エネルギーの同化量から自己の呼吸による異化量を差し引いたものと考えることができる<sup>5)</sup>。自己の呼吸量は材積によって一意的にきまる。しかし、外から受け取る太陽エネルギーの量は、他の林木との空間的な位置関係に左右される。すなわち、同じ材積の林木であっても、林分内の他の上層木に被圧されている林木では、同化器官である葉の部分が十分な太陽エネルギーを受け取ることができない。したがって、生長量も小さくなる。

そこで、同一林分内の各林木の相対幹形が同一であるとするならば、樹高は胸高直径と連動して変化し、直径上位木は、樹高においても上層木となる。そして、うっ閉した林分では、直径上位木は優勢木となり、同化器官が相対的に有利な光条件を得て、より多くの太陽エネルギーを受け取っていると考えられる。このことは、無間伐林分における各直径順位階層ごとの直径生長率の分布を見れば、直径上位木が高い生長率を示していることから明らかである。他方、間伐区においては、直径上位木から下位木まで一様な生長を示している。このことは、間伐によって各林木が十分な生育空間を得て、満度に太陽エネルギーを与えられていることを示している。また、間伐直後の林木の直径生長率が直径の大きさにかかわらず一樣になることは、十分な生育空間を与えられた林木の直径生長率が、その林木の大きさにかかわらないことを示している。

ところで、各林木が十分な生育空間を得ているか否かを示す指標として、筆者らの提案する相対的生長指数を用いれば、各直径順位階層ごとの年平均直径生長率の分布の状態を知ることができる。すなわち、相対的生長指数の値が高い林分では、直径上位木と下位木の間の直径生長率の差異は小さくなっており、林内の光条件が均等であるとみなすことができる。逆に光条件が均等でない林分では、上位木と下位木の直径生長率の差異が大きくなり相対的生長指数の値が低くなると考えられる。また、相対的生長指数の値は、直径分布の変動係数の増減と連動しているので、光条件と直径分布形の間にも一定の関係が認められる。

そこで次に、各林木の得ている光条件と直径分布形の変化の関係について考察する。直径分布の形を変動係数と歪度の値を指標にとって比較してみると、無間伐区においては変動係数と歪度の値が増加しているのに対して、間伐区においてはこの二つの指標の値が比較的安定していることがわかる。このことは、無間伐区においては直径上位木の生長が盛んで、次々に直径階を進級するのにに対して、中・下位木の多くがもとの直径階に取り残されるために、直径分布は拡散しつつ、相対的な重心の位置は左の方に移って行くことを示している。これに対して、間伐区においては、各林木が十分な生育空間を与えられて、直径上位木から下位木まで一様な

表一9 丸太生産量の径級別内訳

Table 9 Log production by size

Japanese cedar																			(単位: m <sup>2</sup> /ha)	
	末口 径		Top-end diameter		40 years old		末口 径		Top-end diameter		48 years old		末口 径		Top-end diameter		54 years old			
	6-12cm	14-18cm	20-28cm	30-38cm	40cm-	Total	6-12cm	14-18cm	20-28cm	30-38cm	40cm-	Total	6-12cm	14-18cm	20-28cm	30-38cm	40cm-	Total		
Heavily thn.																				
Final cut	44	107	280	95	3	529	39	111	350	146	9	655	42	125	407	258	33	865		
Thinning	36	55	34	0	0	125	36	55	34	0	0	125	36	55	34	0	0	125		
Total	80	162	314	95	3	654	74	166	384	146	9	780	78	180	441	258	33	990		
Lightly thn.																				
Final cut	54	127	353	100	0	634	49	130	455	180	11	825	51	150	544	315	38	1098		
Thinning	42	61	43	0	0	146	42	61	43	0	0	146	42	61	43	0	0	146		
Total	96	188	396	100	0	780	91	191	498	180	11	971	93	211	587	315	38	1244		
Unthinned																				
Final cut	85	172	433	131	0	821	79	190	526	192	11	998	81	218	629	316	24	1268		
Hinoki cypress																			(単位: m <sup>2</sup> /ha)	
	末口 径		Top-end diameter		42 years old		末口 径		Top-end diameter		51 years old		末口 径		Top-end diameter		57 years old			
	6-12cm	14-18cm	20-28cm	30-38cm	40cm-	Total	6-12cm	14-18cm	20-28cm	30-38cm	40cm-	Total	6-12cm	14-18cm	20-28cm	30-38cm	40cm-	Total		
Heavily thn.																				
Final cut	73	136	127	0	0	336	56	111	302	38	0	507	59	136	355	70	0	620		
Thinning	60	32	0	0	0	92	60	32	0	0	0	92	60	32	0	0	0	92		
Total	133	168	127	0	0	428	116	143	302	38	0	599	119	168	355	70	0	712		
Lightly thn.																				
Final cut	102	180	101	0	0	383	83	163	293	6	0	545	78	185	355	26	0	644		
Thinning	22	4	0	0	0	26	22	4	0	0	0	26	22	4	0	0	0	26		
Total	124	184	101	0	0	409	105	167	293	6	0	571	100	189	355	26	0	670		
Unthinned																				
Final cut	119	173	104	0	0	396	96	163	276	3	0	538	96	190	351	29	0	666		

Sawara cypress

(単位: m<sup>2</sup>/ha)

	末口径		Top-end diameter		42 years old		末口径		Top-end diameter		51 years old		末口径		Top-end diameter		57 years old	
	6-12cm	14-18cm	20-28cm	30-38cm	40cm-	Total	6-12cm	14-18cm	20-28cm	30-38cm	40cm-	Total	6-12cm	14-18cm	20-28cm	30-38cm	40cm-	Total
Heavily thn.																		
Final cut	97	172	169	2	0	440	56	155	325	31	0	567	53	159	353	83	0	648
Thinning	131	46	10	0	0	187	131	46	10	0	0	187	131	46	10	0	0	187
Total	228	218	179	2	0	627	187	201	335	31	0	754	184	205	363	83	0	835
Lightly thn.																		
Final cut	166	206	133	0	0	505	97	256	297	2	0	652	96	257	362	26	0	741
Thinning	78	15	2	0	0	95	78	15	2	0	0	95	78	15	2	0	0	95
Total	244	221	135	0	0	600	175	271	299	2	0	747	174	272	364	26	0	836
Unthinned																		
Final cut	253	229	159	0	0	641	142	289	309	5	0	745	133	298	361	33	0	285

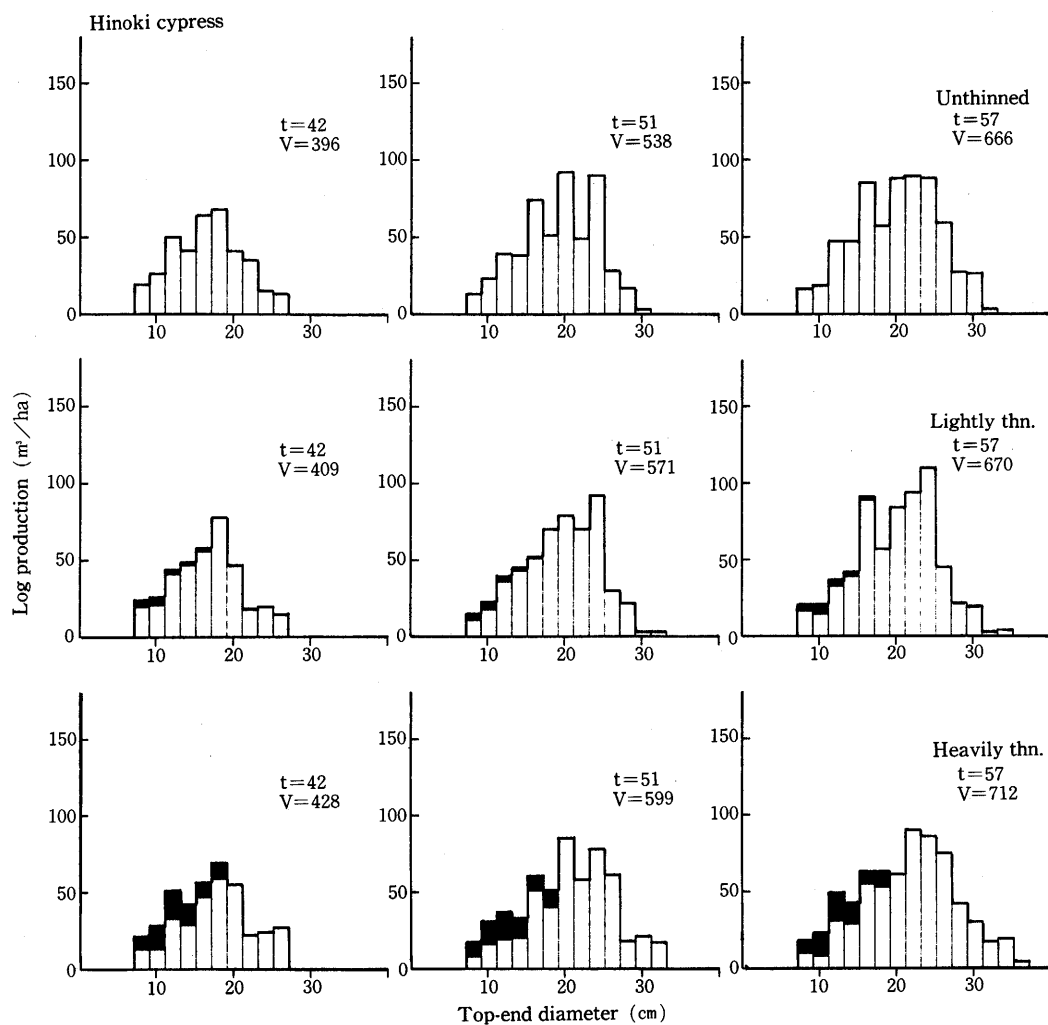


図-16 丸木生産量の総量及び径級別内訳(1)

Fig. 16 Log production in total and by size  
 t : stand age (yr.)    V : Log production in total ( $\text{m}^3/\text{ha}$ )  
 ■ : Log production at thinning

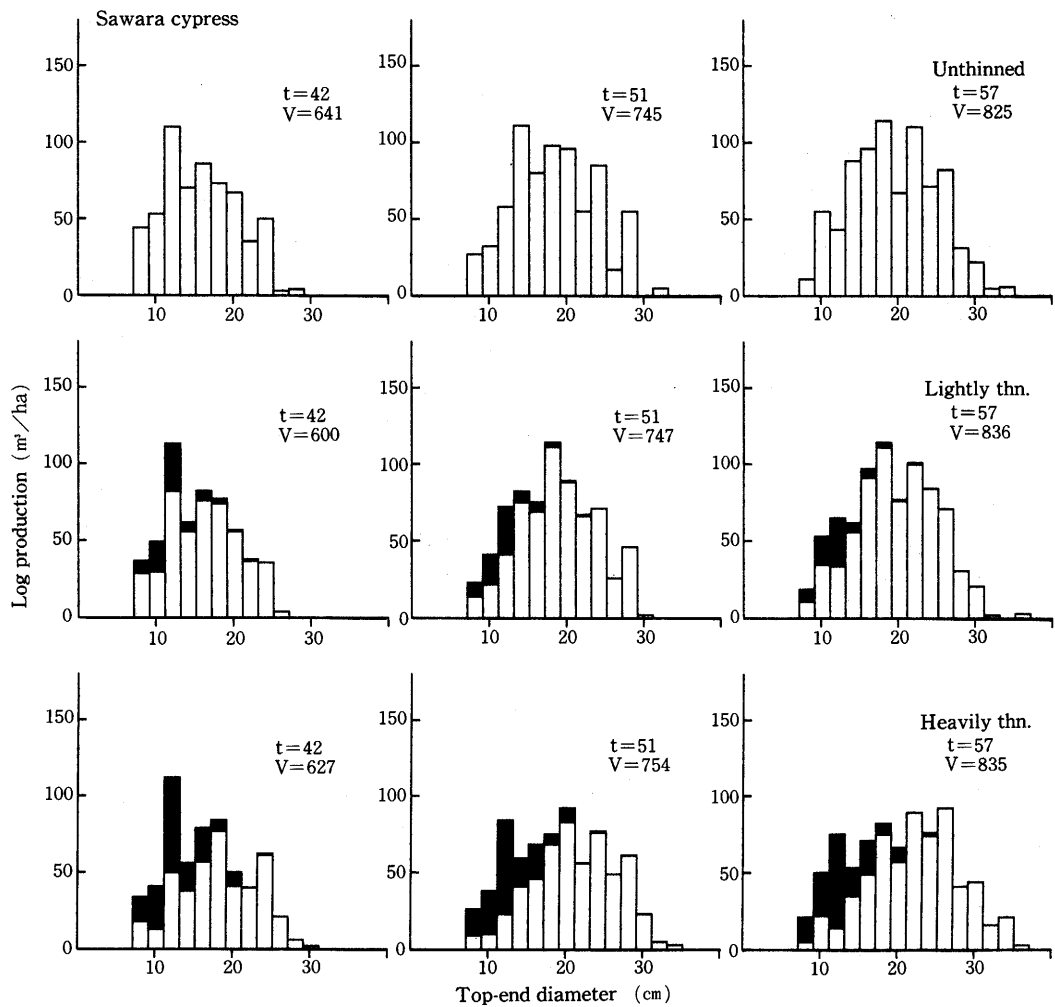


図-16 丸太生産量の総量及び径級別内訳(2)

Fig. 16 Log production in total and by size

生長率で直径が増大するため、直径分布の形が比較的安定している。このように林分の直径分布形の変化は、林分内の各直径階層の直径生長率の違いによって説明することができる。

このことを逆に考えれば、枯損木を除いた林木の直径分布の変動係数が増加する時は、直径下位木の光条件が不十分な状態であることを意味しており、間伐を実行して林内の光条件を改善する必要があると考えることができる。このように、直径分布の変動係数の増減は、林内の太陽エネルギーの配分状態を知る手がかりとなる。

MITSCHERLICH 式の係数  $k$  の直径階層ごとの分布の状態を比較したところ、係数  $k$  の値が大きい林木の割合が、直径順位が下がるにしたがって増える傾向が認められた。この係数  $k$  の値は、図-7 の関係から、林木の年平均直径生長率の指標とみなすことができる。そして、先に述べたように、直径生長率がその林木の得ている光条件の指標であるならば、間伐による係数  $k$  の値の分布の変化は、間伐の影響による光条件の変化の結果であると考えることができる。

しかし、間伐による係数  $k$  の値の分布の変化は、樹種により、間伐強度により異なる。この違いは主として各樹種の耐陰性の違いによるものと考えられる。各樹種ともに、弱度の間伐の結果、まずその影響が現れるのは直径中位木である。このことから、僅かな間伐では光条件の改善は直径下位木まで及ばず、元来光条件に恵まれた直径上位木の生長にも影響を与えていないといえることができる。ヒノキ・サワラでは、間伐の影響の現れ方が直径下位木において、スギ・カラマツより顕著である。これはヒノキ・サワラの方が耐陰性が強いいため、より下位の木まで光条件の改善に敏感に反応して、生長を促進することによるものと考えられる。カラマツは間伐に対する反応が鈍く、かなり強度な間伐によっても直径下位木に間伐の影響は現れていない。これは光条件の改善が下位木の生長を促進するには不十分であったことを示している。

林分としての間伐効果を分析するために、生長測定結果からの単位面積当りの大径木本数を、間伐区と無間伐区で比較したところ、ヒノキ・サワラのように耐陰性の強い樹種のほうが、間伐による直径上位木の生長促進が顕著であった。これに対して、スギ・カラマツのような陽樹では元来優勢であった直径上位木の生育には、間伐の影響は少ない。このことから、間伐によって直径上位木の生長は促進されて、大径木生産効果が期待されるが、各樹種の耐陰性の違いによって、かなりの違いがあり、ヒノキ・サワラのような陰樹のほうが、本数密度の変化が、直径上位木の光条件に対してより強い影響を与えるといえることができる。

さて、太陽エネルギーが一定の割合で断面積生長量に変換されると考えるならば、一定面積に注がれる太陽エネルギーの量が一定であるとする条件のもとで、単位面積当りの断面積生長量は、本数密度にかかわらず一定となるはずである。このことは、間伐試験地の測定結果から確認された。スギ・カラマツのような陽樹の場合、過度な間伐によって樹冠のうっ閉が遅れ、与えられる太陽エネルギーを断面積生長に十分に交換できないことがあるが、一般的には、間

伐をおこなっても樹冠の回復がすみやかにおこなわれ、断面積生長量が太径木に集中するか、各径級に分散するかの違いはあるものの、間伐の有無にかかわらず林分の断面積生長量はほぼ一定であるとみなすことができた。そして、林分の平均樹高は立木密度にかかわらずほぼ一定であるという前提をおけば、断面積合計の関係はそのまま林分材積の関係に変換することができ、林内に注がれる太陽エネルギーが立木密度にかかわらず一定の割合で材積生長量に変換されているということができる。このことは、間伐林分の材積に間伐材積を加えると、無間伐林分の材積に等しくなるという坂口の説<sup>9)</sup>を裏付けている。

次に、相対幹曲線式を使って、各林分からの丸太の生産量を長径級別に推定したところ、ヒノキ・サワラ林分においては間伐の結果、総生産量が増加するとともに大径材の割合が高くなることが認められた。これに対して、スギ林分においては、総生産量および長径級別内訳への間伐の影響は見られなかった。このように、材積に差がないにもかかわらず、丸太生産量に差が生じるのは、大径木と小径木の間に立木から丸太に換算するときの歩止まりの差があるからである。そして、樹種によって丸太生産量の内容に与える間伐の影響が違うのは、二つの理由が考えられる。一つは、先に述べた大径木生産効果の違いによるものである。ヒノキ・サワラのように耐陰性の強い樹種のほうが、間伐による直径上位木の生長促進が顕著であり、丸太材積に換算しても大径材の割合が高くなる。二つ目の理由には、樹幹形の違いがあげられる。スギのほうがヒノキに比べて樹幹形が完満であるので、胸高直径の太さがそのまま幹の上部まで維持され、二本目、三本目の丸太の末口径も大きな値を保つ。これに対して、ヒノキの場合は4 m、8 mと断面高が上がるにしたがって、末口径は小さくなる。このため、末口径をもとにして丸太材積に換算するときに、胸高直径の太さの違いは、幹の形が完満でないヒノキのほうが丸太材積に大きく影響し、間伐区では無間伐区と比べて、より大きな丸太材積を得ることになる。そして、間伐の結果、各樹種ともに主伐時における丸太の径級分布の分散が小さくなっている。このことは、均質な木材が生産されることを示しており、木材を販売する上では好ましいことといえる。

ここで、これまでの考察の結果を取りまとめると次のようなことがいえる。間伐が林木の直径生長に及ぼす影響は、光条件の改善による生長促進であるということができる。健全な林分を維持するためには、直径下位木にまで十分な光条件が与えられ、かつ、林分に与えられる太陽エネルギーを全ての林木が100%利用できるような適度な本数密度を保たなければならない。この「適度な」本数密度は、樹種により異なり、時間とともに変化しているが、直径の変動係数の増減や相対的生長指数を指標にして、常にチェックすることができる。そして、林分内の太陽エネルギーの配分に変化が生じ、直径下位木にまで十分な光条件が与えられなくなったときには、間伐によって新たな生育空間を与える必要がある。十分な生育空間を与えられた林分においては、各林木が均等な直径生長率を示し、安定した直径分布を保つことができる。そし



て、生産される丸太の径級も比較的狭い幅に集中するため、均質な丸太を生産することができ  
る。しかし、光条件の改善は各樹種のもつ耐陰性によって現れ方にかなり差異があり、ヒノキ・  
サワラのような陰樹のほうが、本数密度の変化に対して、光条件が敏感に反応する。

## 要 旨

東京大学秩父演習林内のスギ、ヒノキ、サワラ、カラマツの間伐試験地において、間伐区と  
無間伐区の直径生長測定結果を比較することによって、間伐が林木の直径生長に及ぼす影響を  
様々な角度から検討した。

間伐効果を評価するためには、間伐時における直径分布の違いを考慮すべきであると考え、  
筆者らは、間伐林分と無間伐林分の同じ直径階の林木について、それぞれの生長率を比較する  
ことにした。そして、間伐直後では、各直径階層にわたり直径上位木から下位木までほぼ一様  
な直径生長率を示していることが認められた。また、下位木において間伐区と無間伐区の生長  
率の間に顕著な差異が生じ、この傾向は強度に間伐を行った方が早期にかつ顕著に現れること  
が認められた。この下位木における生長率の違いが原因となって、無間伐区においては変動係  
数と歪度の値が増加しているのに対して、間伐区においてはこの二つの指標の値が比較的安定  
しており、直径分布の形が安定していることが認められた。

次に、樹幹解析資料から、MITSCHERLICH 式  $D = M(1 - e^{-kt})$  は単木の年齢25年生以上の直  
径生長を表現するのに有効な手段であることが認められた。そして、MITSCHERLICH 式の係  
数  $k$  の値は、間伐によって減少し、もう一方の係数  $M$  は  $M = D / (1 - e^{-kt})$  の式によって増加す  
ることが認められた。このことから、筆者らは、間伐が個々の林木の生長曲線の乗り換えをもた  
らしていると考えた。

最後に、断面積生長量と丸太生産量を指標として、林分レベルの間伐効果について分析を行っ  
た。そして、断面積生長量は本数密度にかかわらずほぼ一定であることが認められた。しかし、  
丸太生産の面では、耐陰性の強い樹種において、間伐区の方が大径木の割合が高いという結果  
を得た。

## 引 用 文 献

- 1) DEMING, W.E.: Statistical adjustment of data. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1943
- 2) 平田種男・田中万里子：輪伐期の研究，東大演報73：1—96，1984
- 3) 南雲秀次郎・佐藤 健：Mischerich 式による森林の生長予測，東大演報61：37—102，1965
- 4) 南雲秀次郎・白石則彦・田中万里子：スギ収穫表調製法のシステム化に関する研究—東京大学千葉演習林ス

- ギ林を対象として一，東大演報71：269—330，1981
- 5) PIENAAR, L.V. & TURNBULL, K.J.: The CHAPMAN—RICHARDS generalization of Von BERTALANFFY'S growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. For. Sci. 19:2-22, 1973
  - 6) 坂口勝美：間伐の本質に関する研究，林試研報131：1-95，1961
  - 7) 白石則彦：同齡単純林の生長予測に関する研究，東大演報75：199-256，1986
  - 8) SWEDA, T. & KOIDE, T.: Applicability of growth equation to the growth of trees in stem radius (I) Application to white spruce. J. Jap. For. Soc. 63:113-124, 1981
  - 10) 高田和彦：樹木の生長，生長曲線および生長モデル，林統研誌10：36-41，1985
  - 11) 竹内公男：間伐された林分の蓄積生長式，日林誌62：294-300，1980
  - 12) 田中和博：生長曲線のあてはめ（測樹学実習プログラム NO.4），J. Pc-For. 1(4)：7-14，1983
  - 13) 東京大学農学部附属演習林秩父演習林・東京大学農学部林学科森林経理学研究室：秩父演習林における樹幹解析資料，演習林（東大）25に投稿中
  - 14) 山本博一・伊藤幸也・大畑 茂・佐々木和男・大村和也：秩父演習林における間伐試験地直径生長資料，演習林（東大）25に投稿中
  - 15) 山本博一・伊藤幸也・斎藤 登・大畑 茂：秩父地方における人工林収穫表調製に関する研究（I）—密度の異なるスギ林分の生長比較—，96回日林論：93-94，1985
  - 16) 山本博一・大村和也：間伐効果の樹種による相違について，37回日林関東支論：23-26，1986
  - 17) 山本博一・龍原 哲：東京大学秩父演習林の樹幹解析資料による樹幹形の分析，演習林（東大）25に投稿中

(1986年5月31日受理)

### Summary

In order to analyze the thinning effects on diameter increment, time-series stand data of thinned plots was compared with that of unthinned plots from various angles.

The difference of the diameter distributions just after thinning between thinned plots and unthinned plots influences the increment of the mean diameter. First the authors compared thinned plot and unthinned plot by diameter class in terms of the average growth rate. Then the increment percents of diameter were nearly equal in every diameter class after thinning. The difference of increment percent between thinned plots and unthinned plots was marked in the lower diameter classes. This tendency appeared more quickly and markedly in heavily thinned plots than in lightly thinned plots. The difference of increment percent in the lower diameter classes caused the coefficient of variation and the skewness of the diameter distribution to be more unstable in unthinned plots than in thinned plots.

Next the MITSCHERLICH equation fitted well to the diameter growth curve above 25 years old. The parameter  $k$  of MITSCHERLICH equation, in which the parameter  $L$  was fixed to 1, decreased by thinning. And the parameter  $M$  increased by the following equation.  $M = D / \{1 - \exp(-kt)\}$  This fact showed that thinning changes the growth curve of each tree.

Finally the stand level thinning effects were analyzed in terms of the basal area

increment and timber yield. The increments of basal area were nearly equal regardless of stand density. But timber yield and the percentage of large-sized tree of thinned plots were larger than those of unthinned plots in shade-tolerant species.