

二段林の成長予測に関する研究 (I)

——カラマツ・トドマツ混植林分の成長特性について——

山本博一*・河原 漢*・佐藤昭一**・高橋康夫*

Studies on Growth Prediction of Two-storied Artificial Stands

—Growth characteristics of mixed stands
of Japanese larch and Saghalien fir—

Hirokazu YAMAMOTO*, Shigeru KAWAHARA*,
Shoichi SATO** and Yasuo TAKAHASHI*

I. は じ め に

皆伐一斉更新による森林施業は、表層土の流亡、保水機能の低下、造林木の気象害・病虫害の危険性が高いこと、森林景観上裸地が目立つこと、林業経営上収入・支出の時期が集中することなどの問題を抱えている。これらの問題を解決するための方法として非皆伐施業が提唱されているが、その成長予測については、これまでに十分な資料が蓄積されていない。本研究では二段林についての施業実験がなされている東京大学北海道演習林における調査結果を解析し、二段林の成長予測の方法について検討を加える。

北海道における代表的な造林樹種として、カラマツとトドマツをあげることができる。カラマツは成長が早く、材質の面からも優れた造林樹種であるが、短伐期で、土地を痩せさせ二代目造林が難しいという問題がある。トドマツは凍霜害に弱く、裸地造林の成績は良くない。しかし、カラマツの葉は光の透過性が高く、落葉性があり、トドマツの幼樹には耐陰性がある。また、トドマツはカラマツに比べて伐期が長いので、カラマツの伐採後もトドマツが残り、林地の消耗を防ぐことができる。そこで、トドマツとカラマツを混植すれば、トドマツにとって和らげられた環境が提供され、凍霜害を防ぎ、適度の陽光を得て良好な成長が期待できる。

東京大学北海道演習林では、これらのことを究明するため、1956年にカラマツ・トドマツの混植試験地を設定し¹⁾、様々な立木密度のもとで成長を比較した。本報告では、植栽後34年生までに行われた3回の測定結果をもとに、残存率、直径成長、断面積成長、樹高成長、樹冠半径、材積成長、相対照度、樹幹形について考察を加えた。

II. 調査地の概要と調査の方法

調査地は東京大学北海道演習林 74 林班 g₂ 小班にあり、標高 365~445 m である。土壌の母材

* 東京大学農学部附属演習林北海道演習林

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

** 元東京大学農学部附属演習林北海道演習林

(formerly) University Forest in Hokkaido, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo.

は石英粗面岩で、土壤型はBd型、土性は砂質壤土である。植栽の方法は、1956年にカラマツ・トドマツを同時に均等に植栽した。当初のha当たり植栽密度は、カラマツ500本とトドマツ4000, 3000, 2000本の3通り、カラマツ1000本とトドマツ4000, 3000, 2000本の3通り、カラマツ1500本とトドマツ4000, 3000, 2000, 1000本の4通りの計10通りの組合せの2繰返しとし、この他にカラマツのみの3000, 2000, 1000本区、トドマツのみの3000本区の4通りの一斉林を2箇所ずつ設定し、合計28箇所を設定した(表-1)。1区当たりの平均面積は0.5haである。

保育作業は6年生まで毎年下刈を行い、9年生と14年生時につる切り・除伐、9年生と19年生時にカラマツの枝打ち、14年生と21年生時にカラマツの間伐を実行した。トドマツは3年生時に沢沿いの林分で晩霧の被害を受けている。カラマツはいずれの区においても野鼠の被害を受け本数が減少した。

調査地内の各林木の測定は、1968年、1977年、1990年の3回行なわれたが、調査項目、調査箇所数、標準地の位置は調査の度にそれぞれ異なる。第1回の1968年の調査は12年生時のもので、15林分で20m×20mの標準地調査により、立木本数、胸高直径、樹高、樹冠半径を測定した。このとき、立木本数の異なる5つの林分で相対照度の測定を行なった。林内の地上高10cmと100cmの位置と林外の裸地の3箇所で同時に照度を測定し、相対照度を求めた。測定は10時から15時までの1時間おきに、30秒間隔の30回測定を6回繰返し、1林分につき180回実施した。

第2回目の1977年の調査は21年生時のもので、0.06～0.12haの22林分の標準地調査により、立木本数、胸高直径を測定した。

第3回目の1990年の調査は34年生時のもので、0.09～0.20haの28林分の標準地調査により、立木本数と胸高直径の測定、林分樹高の測定、樹幹解析を行なった。胸高直径は輪尺を用いて0.1cm単位で二方向から測定した。林分樹高の測定は、カラマツについては2つの標準地において各直径階から3本ずつ選び、ブルーメライスで樹高を0.1m単位で測定して樹高曲線を決定し、林分の平均胸高直径と平均樹高を基準とした相対樹高曲線を定めた。その他の標準地については平均胸高直径木3本の樹高を測定し平均樹高とした。一方、トドマツについては各標準地から30本を任意に選び、伐倒して樹高を測定し、標準地ごとに樹高曲線を定め、平均樹高を計算した。樹幹解析は混植林分の2つの標準地からカラマツの平均胸高直径木3本とトドマツの優勢木3本をそれぞれ選び、カラマツ一斉林の標準地からはカラマツの平均胸高直径木3本、トドマツ一斉林の標準地からはトドマツの優勢木3本を選び、合計18本について樹幹解析を行った。

表-1 トドマツ・カラマツの植栽計画
Table 1. Action program of planting

カラマツ Japanese larch (本/ha)	トドマツ Saghalien fir (本/ha)				
	0	1000	2000	3000	4000
0				○	
500			○	○	○
1000	○		○	○	○
1500		○	○	○	○
2000	○				
3000	○				

III. 調査の結果

1. 残存率

a. カラマツ

カラマツは14年生時に間伐を受けているので、自然枯死による本数減少は、当初の12年間

の生育過程においてのみ確認できる (表-2)。一斉林の残存率は71%であったが、トドマツとの混植林分では14林分中12林分において、トドマツの植栽本数にかかわらず一斉林を上回っている。中でも、カラマツの植栽本数が1000本前後の林分で高くなる傾向が認められた。カラマツの1500本区で残存率の低い林分があるが、これは野鼠の被害によるものと思われる。

b. トドマツ

当初の12年間の生育過程では、トドマツも一斉林と比べ混植林分の方が残存率が高い傾向が認められ、14林分中10林分において、一斉林の残存率を上回っている (表-3)。残存率の低い4林分は沢沿いに位置し、霜害の影響を強く受けたものと思われる。トドマツの植栽本数による残存率の差はなく、カラマツの植栽本数が1000本前後の林分でやや高くなる傾向が認められた。

このことから、混植は気象条件を緩和し、特にカラマツ1000本区において、トドマツ・カラマツ相互の初期の生存条件に良い影響を与え合っているといえることができる。

しかし、21年生時には、カラマツの立木本数の多い区では、一斉林と比べて残存率が低くなる傾向を示している (表-5)。トドマツ4000本区の残存率はカラマツ500本区では70%以上であるのに対して、カラマツ1000,1500本区では50%前後となっている。これはカラマツの樹高成長に伴いトドマツにとっての光環境が悪くなるためと思われる。

12年生から21年生までの9年間の枯損率を見ると、カラマツの立木本数と期間中の枯損率の間に5%水準の有意度³⁾で正の相関関係が認められる (表-8)。これはカラマツが林分全体の光環境を支配していることを示している。これに対して、トドマツの立木本数と枯損率との間には相関は認められない。

34年生時には一斉林の残存率が52%であるのに対して、混植林分では一斉林よりもやや低い値を示している (表-7)。21年生から34年生までの13年間の枯損率を見ると、この時点ではカラマツの立木本数による影響は認められないが、トドマツの立木本数との間に1%水準の有意な正の相関関係が認められる (表-9)。このことから、21年生以降の段階ではカラマツとの関係よりもトドマツ同士の生存競争が生じているといえることができる。

2. 直径成長

a. カラマツ

12年生時のカラマツの平均直径は、カラマツの立木本数が少ない林分ほど大きい (表-2)。これは密度効果によるものと思われ、この時点でカラマツの個体間の競争が始まっているとみなすことができる。しかし、トドマツの存在がカラマツの直径成長に影響を与えているとは認められない。

21年生時、34年生時においても、同様に平均直径は立木本数が多い林分ほど小さくなる傾向が認められる (表-4, 6)。逆に、34年生時の直径分布の変動係数は、立木本数が多い林分ほど大きくなる傾向が認められる。これは個体間の競争関係の厳しい林分ほど、直径下位木の成長が抑制されて、直径上位木と下位木との成長速度の差が大きくなるためである。

b. トドマツ

12年生時のトドマツの平均直径は、カラマツ500本区ではトドマツ一斉林の値を上回り、トドマツの立木本数の多い林分の方が平均直径が大きくなり、トドマツの密度効果は認められない。しかし、カラマツ1000本区、1500本区ではトドマツ一斉林の値を下回り、カラマツの存在

表-2 12年生時のカラマツの生育状況
Table 2. Growing record of Japanese larch at 12 years old

立木本数 (本/ha) Number of trees per hectare		残存率 Residual rate		胸高直径 d. b. h.		平均樹高 Average height		胸高断面積合計 Basal area		林分材積 Stand volume		樹冠半径 Crown radius	
植栽時 (計画) Planting plan	植栽時 (実行) Practice	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.
カラマツ	トドマツ	カラマツ	トドマツ	カラマツ	トドマツ	カラマツ	トドマツ	カラマツ	トドマツ	カラマツ	トドマツ	カラマツ	トドマツ
一斉林 (uniform stand)													
3000	0	3188	0	2275	71.36	10.82	100	10.18	100	21.90	100	123.08	100
混植林分 (mixed planting stand)													
500	2000	587	2475	475	80.92	14.69	136	10.21	100	8.36	38	41.04	33
500	3000	539	3125	400	74.21	14.02	130	9.73	96	6.51	30	31.48	26
500	4000	443	4213	450	101.58	14.96	138	9.66	95	8.63	39	36.68	30
500本区の平均					85.57		135		97		36		30
1000本区の平均													
1000	2000	948	2532	975	102.85	13.28	123	9.27	91	14.27	65	59.96	49
1000	3000	1183	2199	900	76.08	13.91	129	10.35	102	13.91	64	64.25	52
1000	4000	828	2836	650	78.50	12.21	113	11.05	109	8.02	37	42.38	34
1000	5000	1041	1673	1100	105.67	12.77	118	9.46	93	14.37	66	52.50	43
1000	6000	1029	3761	900	87.46	14.87	137	11.61	114	16.01	73	90.72	74
1000本区の平均					90.11		124		102		61		50
1500本区の平均													
1500	1000	1818	1250	1000	55.01	11.39	105	10.20	100	10.42	48	55.50	45
1500	2000	1560	2201	1425	91.35	12.31	114	10.04	99	17.60	80	96.33	78
1500	3000	1333	2753	1200	90.02	12.80	118	10.76	106	15.88	72	79.32	64
1500	4000	1208	2701	975	80.71	12.86	119	9.94	98	13.17	60	71.57	58
1500	5000	1710	4684	1475	86.26	12.75	118	10.96	108	19.35	88	92.83	75
1500	6000	1696	3715	1050	61.91	12.86	119	10.25	101	14.03	64	76.55	62
1500本区の平均					77.54		115		102		69		64

指数は一斉林の値を100とした。

index is a percentage of mixed planting stand to uniform stand

表-3 12年生時のトドマツの生育状況
Table 3. Growing record of Saghalien fir at 12 years old

立木本数 (本/ha) Number of trees per hectare				残存率 Residual rate		胸高直径 d. b. h.		平均樹高 Average height		胸高断面積合計 Basal area		樹冠半径 Crown radius		変動係数 (直径) c. v. (d. b. h.)
植栽時 (計画) Planting plan	植栽時 (実行) Practice	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	12年生 12 yrs.	cm	指数	m	指数	m ² /ha	指数	cm	指数	
カラマツ	トドマツ	カラマツ	トドマツ	トドマツ										
一斉林 (uniform stand)														
0	3000	0	3130	2100		3.70	100	3.43	100	2.42	100	67.3	100	0.265
混植林分 (mixed planting stand)														
500	2000	587	2475	1475		3.36	91	3.44	100	1.62	67	63.1	94	0.473
500	3000	539	3125	2500		4.26	115	4.25	124	3.91	162	72.1	107	0.305
500	4000	443	4213	3475		4.30	116	4.60	134	5.37	222	77.9	116	0.246
500本区の平均														
1000	2000	948	2532	1775		3.31	89	3.45	101	1.80	75	70.7	105	0.417
1000	2000	1183	2199	1825		3.95	107	4.41	129	2.51	104	73.2	109	0.340
1000	3000	828	2836	2125		3.43	93	3.38	98	2.07	86	64.6	96	0.242
1000	3000	1041	1673	1725		3.16	85	3.55	104	1.57	65	57.7	86	0.399
1000	4000	1029	3761	1925		2.42	65	3.00	87	0.99	41	56.9	85	0.338
1000本区の平均														
1500	1000	1818	1250	700		3.41	92	3.80	111	0.75	31	70.1	104	0.409
1500	2000	1560	2201	1900		3.57	96	3.99	116	2.03	84	74.6	111	0.260
1500	3000	1333	2753	2500		3.21	87	3.66	107	2.30	95	64.3	96	0.363
1500	3000	1208	2701	2125		3.89	105	4.19	122	2.88	119	79.6	118	0.365
1500	4000	1710	4684	2875		3.00	81	3.56	104	2.47	102	71.9	107	0.451
1500	4000	1696	3715	2975		3.11	84	3.57	104	2.66	110	68.6	102	0.416
1500本区の平均														
							91		111		90		106	0.377

指数は一斉林の値を100とした。

index is a percentage of mixed planting stand to uniform stand

表-4 21年生時のカラマツの生育状況
Table 4. Growing record of Japanese larch at 21 years old

植栽時 (計画) Planting plan	立木本数 (本/ha) Number of trees per hectare		植栽時 (実行) Practice	残存率 Residual rate		胸高直径 d. b. h.	平均樹高 Average height	断面積 合計 Basal area	林分材積 Stand volume	単木材積 Individual volume	間伐率 Thinning ratio	相対幹距 Relative spacing	
	トラマトツ	カラマトツ	トラマトツ	21年生 21 yrs.	21年生 21 yrs.	cm	m	m ² /ha	m ³ /ha	m ³ /本	%	間伐前 Before thin.	間伐後 After thin.
カラマトツ	トラマトツ	カラマトツ	トラマトツ	21年生 21 yrs.	カラマトツ								
一斉林 (uniform stand)													
3000	0	3070	0	1002	32.64	18.0	19.3	27.50	200	0.199	11	16.34	17.30
混植林分 (mixed planting stand)													
500	2000	409	1836	293	71.62	23.1	18.8	12.84	117	0.399	25	31.09	35.88
500	2000	587	2475	379	64.61	21.2	18.8	13.85	125	0.330	20	27.31	30.44
500	3000	539	3125	328	60.88	23.5	18.0	14.69	131	0.399	49	30.74	42.82
500	3000	466	2597	403	86.40	22.4	20.7	16.42	133	0.330	31	24.04	28.95
500	4000	483	3977	424	87.79	22.6	21.0	17.66	140	0.330	52	23.11	33.48
500	4000	443	4213	438	98.83	24.3	17.4	21.40	175	0.400	56	27.42	41.52
500本区の平均													
					78.36	22.9	19.1	16.14	137	0.365	39	27.29	35.52
1000	2000	948	2532	485	51.18	21.0	17.6	17.59	160	0.330	53	25.74	37.70
1000	2000	1183	2199	558	47.17	20.2	19.3	18.28	145	0.260	44	21.98	29.44
1000	3000	828	2836	490	59.19	20.2	19.3	16.34	127	0.260	41	23.35	30.30
1000	3000	1041	1673	453	43.50	20.9	18.4	15.80	118	0.260	27	25.56	30.00
1000	4000	1029	3761	653	63.44	21.2	20.7	23.56	125	0.329	35	18.90	23.48
1000	4000	484	4012	308	63.57	23.1	19.3	13.42	123	0.399	18	29.49	32.60
1000本区の平均													
					54.68	21.1	19.1	17.50	148	0.306	37	24.17	30.59
1500	1000	1818	1250	811	44.61	18.0	18.3	21.13	162	0.200	0	19.20	19.20
1500	1000	1478	972	637	43.11	21.3	18.1	23.47	210	0.330	0	21.95	21.95
1500	2000	1560	2201	735	47.12	19.3	18.8	22.13	191	0.260	40	19.65	25.40
1500	2000	1175	1838	632	53.78	20.2	19.6	20.77	164	0.259	38	20.29	25.66
1500	3000	1333	2753	591	44.33	20.1	19.1	19.32	154	0.261	43	21.53	28.52
1500	3000	1208	2701	594	49.19	19.6	18.7	18.48	154	0.259	46	21.98	29.99
1500	4000	1710	4684	836	48.90	18.3	19.3	22.66	167	0.200	41	17.89	23.22
1500	4000	1696	3715	746	43.99	19.8	18.5	23.69	194	0.260	38	19.75	25.09
1500本区の平均													
					46.88	19.6	18.8	21.46	175	0.254	31	20.28	24.88

表-5 21年生時のトドマツの生育状況
Table 5. Growing record of Saghalien fir at 21 years old

立木本数 (本/ha) Number of trees per hectare		残存率 Residual rate	胸高直径 <i>d. b. h.</i>	林分材積 Stand volume	単木材積 Individual volume	断面積合計 Basal area	カラマツ + トドマツ	
植栽時 (計画) Planting plan	植栽時 (実行) Practice						材 積 Stand volume	断面積 Basal area
トドマツ	カラマツ	トドマツ	トドマツ	トドマツ	トドマツ	トドマツ	m ³ /ha	m ² /ha
カラマツ	トドマツ	カラマツ	トドマツ	トドマツ	トドマツ	トドマツ	m ³ /ha	m ² /ha
一斉林 (uniform stand)								
0	0	3130	1971	62.97	7.7	39	0.0198	9.18
混植林分 (mixed planting stand)								
500	2000	409	1836	51.25	5.9	9	0.0096	2.69
500	2000	587	2475	46.58	6.3	12	0.0104	3.72
500	3000	539	3125	67.81	7.2	42	0.0198	8.91
500	3000	466	2597	58.41	6.1	15	0.0099	4.58
500	4000	483	3977	71.18	6.6	28	0.0099	10.06
500	4000	443	4213	77.20	7.1	65	0.0200	13.56
500本区平均				62.07	6.5	29	0.0133	7.25
1000本区平均								
1000	2000	948	2532	47.64	5.8	12	0.0100	3.34
1000	2000	1183	2199	50.75	6.5	11	0.0099	3.79
1000	3000	828	2836	58.25	6.4	16	0.0097	5.53
1000	3000	1041	1673	100.25	6.1	17	0.0101	4.98
1000	4000	1029	3761	41.32	4.5	16	0.0103	2.53
1000	4000	484	4012	45.89	6.2	18	0.0098	5.78
1000本区平均				57.35	5.9	15	0.0100	4.32
1500本区平均								
1500	1000	1818	1250	58.97	4.4	5	0.0096	0.81
1500	1000	1478	972	60.34	5.4	4	0.0094	1.01
1500	2000	1560	2201	60.68	5.4	11	0.0101	2.56
1500	2000	1175	1838	54.09	6.8	13	0.0100	4.84
1500	3000	1333	2753	56.22	5.6	20	0.0102	4.99
1500	3000	1208	2701	62.50	6.1	17	0.0101	5.09
1500	4000	1696	3715	55.19	5.4	21	0.0102	4.84
1500	4000	1710	4684	45.20	4.5	21	0.0099	3.47
1500本区平均				53.67	5.5	14	0.0099	3.45

表-6 つづき

Table 6. continued

立木本数 (本/ha) Number of trees per hectare				胸高直径 d b. h.		平均樹高 Average height	相對幹距 Relative spacing	断面積 合計 Basal area	林分材積 Stand volume	単木材積 Individual volume	カラマツ+トドマツ 材積 Stand volume	
植栽時 (計画) Planting plan	植栽時 (実行) Practice	21 年生 21 yrs.	カラマツ	cm	cm	m		m ² /ha	m ³ /ha	m ³ /本	m ² /ha	材積 Stand volume
カラマツ	トドマツ	カラマツ	トドマツ									
1000	2000	948	2532	235	31.08	0.181	25.12	18.39	237	1.009	37.32	396
1000	2000	1183	2199	301	30.58	0.173	26.74	22.79	311	1.033	39.50	453
1000	3000	828	2836	185	31.22	0.153	24.89	14.51	181	0.978	36.65	369
1000	3000	1041	1673	309	31.47	0.110	26.77	24.31	328	1.061	37.45	436
1000	4000	1029	3761	271	31.87	0.135	27.28	21.99	301	1.111	29.67	347
1000	4000	484	4012	327	31.53	0.125	26.48	25.97	344	1.052	39.26	452
1000本区平均												
1500	1000	1818	1250	449	26.58	0.161	24.28	25.55	322	0.717	29.95	353
1500	1000	1478	972	581	28.60	0.189	23.46	38.61	467	0.804	42.18	492
1500	2000	1560	2201	477	29.19	0.135	26.20	32.48	431	0.904	40.86	493
1500	2000	1175	1838	302	32.86	0.130	25.48	26.07	330	1.093	41.48	462
1500	3000	1333	2753	377	29.67	0.177	25.04	26.42	338	0.897	41.87	452
1500	3000	1208	2701	191	33.76	0.144	26.18	17.46	227	1.188	40.50	435
1500	4000	1710	4684	456	29.28	0.185	25.13	31.80	415	0.910	44.59	498
1500	4000	1696	3715	359	29.41	0.186	24.87	25.27	322	0.897	40.47	433
1500本区平均												
					29.92	0.163	25.08	27.96	357	0.926	40.24	452

表-7 34年生時のトドマツの生育状況
Table 7. Growing record of Saghalien fir at 34 years old

立木本数 (本/ha) Number of trees per hectare			残存率 Residual rate	胸高直径 <i>d. b. h.</i>		平均樹高 Average height	断面積合計 Basal area	林分材積 Stand volume	単木材積 Individual volume
植栽時 (計画) Planting plan	植栽時 (実行) Practice	21年生 21 yrs.		平均 Average	変動係数 c. v.				
カラマツ	カラマツ	トドマツ	%	cm		m	m ² /ha	m ³ /ha	m ³ /本
一斉林 (uniform stand)									
0	0	3130	51.59	16.47	0.343	15.54	38.45	349	0.216
混植林分 (mixed planting stand)									
500	409	802	43.68	13.85	0.485	13.80	14.93	137	0.171
500	587	1097	44.32	10.69	0.414	11.30	11.52	93	0.085
500	539	1534	49.09	14.63	0.417	15.60	30.27	295	0.192
500	466	2597	45.05	10.49	0.395	11.28	11.69	93	0.079
500	483	3977	45.61	13.75	0.383	14.93	30.88	288	0.159
500	443	2022	48.00	12.84	0.388	13.98	30.11	269	0.133
500本区平均			45.96	12.71	0.414	13.48	21.57	196	0.139
1000本区平均									
1000	948	2532	49.65	12.77	0.419	12.25	18.93	159	0.126
1000	1183	2199	55.93	12.08	0.429	11.62	16.71	142	0.115
1000	828	2836	58.21	12.30	0.358	12.88	22.14	188	0.114
1000	1041	1673	71.19	10.56	0.501	10.36	13.14	108	0.091
1000	1029	3761	26.93	9.13	0.398	6.62	7.68	46	0.045
1000	484	4012	36.39	9.86	0.438	11.03	13.29	108	0.074
1000本区平均			49.72	11.12	0.424	10.79	15.32	125	0.096
1500本区平均									
1500	1818	1250	38.48	10.00	0.406	8.97	4.40	31	0.064
1500	1478	972	34.68	10.76	0.406	8.93	3.57	25	0.074
1500	1560	2201	44.89	9.89	0.321	10.25	8.38	62	0.063
1500	1175	1838	62.36	12.13	0.404	12.25	15.41	132	0.115
1500	1333	2753	61.90	10.29	0.299	11.24	15.45	114	0.067
1500	1208	2701	50.69	13.62	0.393	13.48	23.04	208	0.152
1500	1710	4684	40.10	8.77	0.358	8.87	12.79	83	0.044
1500	3715	1626	43.77	10.25	0.365	10.62	15.20	111	0.068
1500本区平均	1696		47.11	10.71	0.369	10.58	12.28	96	0.081

がトドマツの直径成長に影響を与えている。さらに、トドマツの立木本数の多い林分の方が平均直径が小さくなっており、ここではトドマツの密度効果が認められる (表-3)。

直径分布の変動係数は、混植林分ではトドマツ一斉林の値を上回り、カラマツの立木本数が多いほど変動係数が大きくなる傾向が認められる。これはトドマツ同士の競争関係が一斉林よりも混植林分の方が厳しく、混植林分の中でもカラマツの立木本数が多い林分ほど、直径上位木と下位木との成長速度の差が大きいことを示している。

21年生時には、混植林分では一斉林よりも立木本数の少ない林分でも、一斉林の平均直径を下回り、カラマツの立木本数との間には相関係数 -0.683 で1%水準の有意度の負の相関関係が認められ、トドマツの立木本数との間には相関係数 0.560 で5%水準で有意な正の相関関係が認められる (表-5)。このことから、この時点ではトドマツよりもカラマツの立木本数の方がトドマツの平均直径と相関が高いということができる。

34年生時でも、一斉林の平均直径が最も大きい値を示しており、カラマツの立木本数との間には21年生時よりも高い負の相関関係 (相関係数 -0.754) が認められ、カラマツの影響が大きいと言うことができる (表-7)。トドマツ同士の関係は、トドマツの立木本数との間の相関が低く (相関係数 0.187)、トドマツの密度効果は認められない。しかし、直径分布の変動係数は20林分中18林分で一斉林の値を上回っており、上位木と下位木との成長速度の差が大きいことを示している。

3. 断面積成長

胸高断面積合計は、立木本数と胸高直径の関数であり、林分全体のカラマツとトドマツの関係を示す指標として有効である。

a. トドマツ

12年生時には、一部の霜害林分を除いて、カラマツの立木本数にかかわらず、トドマツの立木本数の多い林分の方が胸高断面積が大きくなる傾向が認められる (表-3)。したがって、この時点ではカラマツはトドマツの胸高断面積成長を阻害していないということができる。

21年生時には、カラマツ500本区ではトドマツの立木本数に応じて断面積合計が大きくなる傾向が認められるが、1000本区、1500本区ではトドマツの立木本数の多い林分においても一斉林の値を下回り、カラマツの立木本数の影響の方が大きいということができる (表-5)。このことは、こ

表-8 12年生から21年生までのトドマツの枯損率

Table 8. Mortality of Saghalien fir from 12 years old to 21 years old

立木本数 (本/ha) Number of trees per hectare				枯損率 (%) Mortality
カラマツ Japanese larch		トドマツ Saghalien fir		トドマツ Saghalien fir
12 yr.	21 yr.	12 yr.	21 yr.	12-21 yr.
A	B	C	D	E
0	0	2100	1971	6.14
400	328	2500	2119	15.24
450	438	3475	3252	6.42
475	379	1475	1153	21.83
650	490	2125	1652	22.26
900	653	1925	1554	19.27
900	558	1825	1116	38.85
975	594	2125	1688	20.56
975	485	1775	1206	32.06
1000	811	700	523	25.29
1050	746	2975	2050	31.09
1100	453	1725	1677	2.78
1200	591	2500	1966	21.36
1425	735	1900	1085	42.89
1475	836	2875	2117	26.37

相関関係: correlation

$E=8.22+0.0161A$ $R=0.564^*$

$E=4.84+0.0321B$ $R=0.599^*$

$E=29.62+0.0035C$ $R=0.205$

R 相関係数: correlation coefficient

* 5%水準で有意: significant at 5% level

表-9 21年生から34年生までのトドマツの枯損率
 Table 9. Mortality of Saghalien fir from 21 years old to 34 years old

立木本数 (本/ha) Number of trees per hectare		枯損率 (%) Mortality		相対幹距 Relative spacing			
カラマツ Japanese larch		トドマツ Saghalien fir		トドマツ Saghalien fir	カラマツ Japanese larch		
21 yr.	34 yr.	21 yr.	34 yr.	21-34 yr.	21 yr.	34 yr	average
A	B	C	D	E	F	G	H
220	161	941	802	14.77	35.88	30.56	33.22
303	305	1153	1097	4.86	30.44	22.18	26.31
167	127	2119	1534	27.61	42.82	35.93	39.38
278	249	1517	1170	22.87	28.95	23.21	26.08
204	138	2831	1814	35.92	33.48	35.37	34.43
193	164	3252	2022	37.82	41.52	33.51	37.52
228	235	1206	1257	-4.23	37.70	25.97	31.84
312	301	1116	1230	-10.22	29.44	21.56	25.50
289	185	1652	1651	0.06	30.30	29.54	29.92
331	309	1677	1191	28.98	30.00	21.25	25.63
424	271	1554	1013	34.81	23.48	22.27	22.88
253	327	1841	1460	20.70	32.60	20.88	26.74
811	449	523	481	8.03	19.20	19.44	19.32
637	581	427	337	21.08	21.95	17.68	19.82
441	477	1085	988	8.94	25.40	17.48	21.44
392	302	1299	1146	11.78	25.66	22.58	24.12
337	377	1966	1704	13.33	28.52	20.57	24.55
321	191	1688	1369	18.90	29.99	27.64	28.82
493	456	2050	1878	8.39	23.22	18.63	20.93
463	359	2117	1626	23.19	25.09	21.22	23.16

相関関係: correlation

$$E = 21.238 - 0.0137A \quad R = 0.164$$

$$E = -1.181 + 0.0110C \quad R = 0.571^{**}$$

$$E = 3.947 + 0.4174F \quad R = 0.197$$

$$E = -3.854 + 0.8301G \quad R = 0.360$$

** 1%水準で有意: significant at 1% level

の時点で混植林分のトドマツの断面積成長は、カラマツの影響を受け始め、トドマツ林分としてはうっ閉した状態であることを示唆している。次に、12年生から21年生までの9年間のトドマツの断面積成長を粗成長量の観点から見ることにする(表-10)。この間の一斉林の断面積粗成長量は $6.89 \text{ m}^2/\text{ha}$ で、混植林分ではカラマツ 500 本、トドマツ 4000 本植栽の1林分を除いて、全て一斉林の断面積粗成長量を下回っている。これはカラマツがトドマツの胸高断面積成長を阻害しているためと考えられる。そこで、このカラマツの影響の程度を林分密度の指標である相対幹距によって表わすことにする。

相対幹距は林分の平均樹高に対する平均幹距の比である²⁾。ha 当たりの立木本数の平方根が 100 m 当たりの立木本数となるので、 $100/\sqrt{\text{ha 当たりの立木本数}}$ が平均幹距となる。したがって、ha 当たりの立木本数と林分平均樹高から相対幹距を求めることができる。そこで、カラ

表-10 トドマツの胸高断面積粗成長量とカラマツの相対幹距の関係 (12~21 年生)

Table 10. Relationship between gross basal area increment of Saghalien fir and relative spacing of Japanese larch (12-21 yr. old)

胸高断面積 Basal area		枯損量 Mortality	粗成長量 Increment	対照区成長比* Ratio	相対幹距 (カラマツ) Relative spacing (larch)		
12 yr.	21 yr.	12-21 yr.	12-21 yr.		12 yr.	21 yr.	Average
A	B	C	D=B-A+C	E=D/6.89	F	G	H=(F+G)/2
m ² /ha	m ² /ha	m ² /ha	m ² /ha	%	%	%	%
5.37	13.56	0.32	8.52	123.70	48.80	27.42	38.11
3.91	8.91	0.54	5.55	80.48	51.39	30.74	41.06
2.07	5.53	0.44	3.89	56.48	35.50	23.35	29.42
1.57	4.98	0.04	3.45	50.02	31.89	25.56	28.73
2.30	4.99	0.43	3.12	45.27	26.84	21.53	24.19
2.66	4.84	0.70	2.88	41.80	30.11	19.75	24.93
2.88	5.09	0.52	2.73	39.63	32.22	21.98	27.10
1.62	3.72	0.29	2.39	34.66	44.96	27.31	36.13
2.51	3.79	0.87	2.15	31.17	32.22	21.98	27.10
1.80	3.34	0.49	2.02	29.34	34.55	25.74	30.14
0.99	2.53	0.17	1.71	24.81	28.71	18.90	23.81
2.47	3.47	0.54	1.54	22.34	23.76	17.89	20.82
2.03	2.56	0.82	1.34	19.46	26.40	19.65	23.03
0.75	0.81	0.16	0.22	3.26	31.02	19.20	25.11

* 対照区成長比とは期間中の一斉林の胸高断面積粗成長量 (6.89 m²/ha) に対する混植林分の胸高断面積粗成長量の割合である。

Ratio between lower trees and uniform stand in terms of gross basal area increment. This ratio is directly proportion to relative spacing of upper trees.

相関関係: Correlation $E = -0.446 + 0.0301 H$ 相関係数 $R = 0.789$

マツの相対幹距とトドマツの断面積粗成長量との関係を調べることにする。

12 年生時と 21 年生時とはカラマツの相対幹距はすべての林分で減少している。これは、林分の平均樹高の増加の割には、本数減少率が小さいためである。このように相対幹距は林齢とともに変化するものであるので、ある成長期間中の相対幹距の値は期首と期末の平均値を用いることにする。表-10 から各林分のカラマツの相対幹距の平均値と一斉林に対する混植林分の断面積粗成長量の比との間に正の相関関係が認められる。この直線回帰式は

$$y = -0.446 + 0.0301x \quad \text{相関係数 } 0.789 \quad (1)$$

となる。ただし、 x は相対幹距の平均値、 y は一斉林に対する混植林分の断面積粗成長量の比である。t 検定の結果、1% の水準で有意な相関関係であることが認められた。また、カラマツの相対幹距とカラマツの断面積粗成長量の間には負の相関関係が認められた。

34 年生時のトドマツの胸高断面積合計は、カラマツの立木本数の多い林分ほど小さくなる傾向があり、カラマツの 34 年生時の相対幹距とトドマツの胸高断面積合計の間にも、相関係数 0.960 の正の相関関係が認められた (表-7)。このことは、21 年生以降も、トドマツの断面積成長とカラマツの相対幹距の間には高い相関関係が存在することを示唆している。そこで、21 年生から 34 年生までの 13 年間のトドマツの断面積粗成長量とその間のカラマツの相対幹距の関係を調べてみることにする。

表-11 トドマツの胸高断面積粗成長量とカラマツの相対幹距の関係 (21~34 年生)

Table 11. Relationship between gross basal area increment of Saghalien fir and relative spacing of Japanese larch (21-34 yr. old)

胸高断面積 Basal area		枯損量 Mortality	粗成長量 Increment	対照区成長比* Ratio	相対幹距 (カラマツ) Relative spacing (larch)		
21 yr.	34 yr.	21-34 yr.	21-34 yr.		21 yr.	34 yr.	Average
A	B	C	D=B-A+C	E=D/30.94	F	G	H=(F+G)/2
m ² /ha	m ² /ha	m ² /ha	m ² /ha	%	%	%	%
10.06	30.88	3.48	24.30	78.55	33.48	35.37	34.42
8.91	30.27	2.38	23.74	76.73	42.82	35.93	39.38
13.56	30.11	4.87	21.42	69.21	41.52	33.51	37.52
5.09	23.04	0.93	18.89	61.04	29.99	27.64	28.82
5.53	22.14	0.00	16.61	53.70	30.30	29.54	29.92
3.34	18.93	-0.13	15.46	49.97	37.70	25.97	31.84
2.69	14.93	0.38	12.62	40.79	35.88	30.56	33.22
3.79	16.71	-0.38	12.55	40.55	29.44	21.56	25.50
4.84	15.20	0.97	11.33	36.61	25.09	21.22	23.16
4.84	15.41	0.56	11.13	35.96	25.66	22.58	24.12
4.99	15.45	0.65	11.11	35.90	28.52	20.57	24.54
3.47	12.79	0.38	9.70	31.35	23.22	18.63	20.93
4.98	13.14	1.42	9.58	30.95	30.00	21.25	25.62
5.78	13.29	1.15	8.66	27.99	32.60	20.88	26.74
4.58	11.69	1.01	8.12	26.25	28.95	23.21	26.08
3.72	11.52	0.17	7.97	25.77	30.44	22.18	26.31
2.56	8.38	0.22	6.05	19.54	25.40	17.48	21.44
2.53	7.68	0.86	6.01	19.44	23.48	22.27	22.88
0.81	4.40	0.06	3.65	11.80	19.20	19.44	19.32
1.01	3.57	0.21	2.76	8.94	21.95	17.68	19.81

* 対照区成長比とは期間中の一斉林の胸高断面積粗成長量 (30.94 m²/ha) に対する混植林分の胸高断面積粗成長量の割合である。

Ratio between lower trees and uniform stand in terms of gross basal area increment. This ratio is directly proportion to relative spacing of upper trees.

相関関係: Correlation $E = -0.455 + 0.0312 H$ 相関係数 $R = 0.885$

13 年間のトドマツ一斉林の断面積粗成長量は 30.94 m²/ha で、混植林分では全で一斉林の断面積粗成長量を下回っている。また、カラマツは 21 年生時の測定後間伐が実行されており、間伐後の相対幹距と 34 年生時の相対幹距の平均を期間中の相対幹距とした (表-11)。各林分のカラマツの相対幹距と一斉林に対する断面積粗成長量の比との間には

$$y = -0.455 + 0.0312x \quad \text{相関係数 } 0.885 \quad (2)$$

の正の相関関係が認められる。t 検定の結果から 1% の水準で有意な相関関係であることが認められた。ここで注目すべきことは、断面積粗成長量を一斉林に対する比という相対化された値にすることによって、直線回帰式の (1) 式と (2) 式の係数がほぼ同じ値を示していることである。このことは、予測しようとする期間中のトドマツ一斉林の断面積粗成長量を与えられれば、この回帰式を用いてカラマツの相対幹距から期間中の混植林分の断面積粗成長量を推定することが可能であることを意味している。

b. カラマツ

12年生時の胸高断面積合計は、カラマツの立木本数が多い林分ほど大きい(表-2)。例えば、1000本区では500本区のほぼ倍の胸高断面積合計である。このことから、カラマツがすべての生育空間を利用しているわけではなく、十分にうっ閉している状態にあるとはいえない。

21年生時においても同様の傾向が認められる(表-4)。相対幹距(x)と一斉林に対する断面積比(y)の間には高い負の相関関係が認められ、

$$y = 1.49 - 0.036x \quad \text{相関係数} - 0.926 \quad (3)$$

の直線回帰式が得られる。21年生までの9年間の断面積粗成長量は、その間の相対幹距の平均(x)との間に負の相関があり、カラマツ一斉林の断面積粗成長量に対する混植林分の成長量比(y)は、

$$y = 1.18 - 0.021x \quad \text{相関係数} - 0.825 \quad (4)$$

となる(表-12)。ある時点における相対幹距(x)と一斉林に対する断面積比(y)の関係は34年生時においても、負の相関関係が認められる。

$$y = 1.52 - 0.034x \quad \text{相関係数} - 0.930 \quad (5)$$

という有意な関係があるとともに、(5)式の係数が21年生時の(3)式の値と非常に近いことも注目すべきことである。これは相対幹距の値が15%前後の値を上回ると、生育空間に遊びが生じてカラマツの成長には利用されなくなることを示唆している。また、間伐後の21年生から34年生までの13年間の断面積粗成長量についても同様の相関を調べたが、その間の相対幹距の平均(x)と混植林分の成長量比(y)との間には、

$$y = 1.45 - 0.019x \quad \text{相関係数} - 0.469 \quad (6)$$

の関係が成り立ち、5%の水準で有意な負の相関関係が認められる(表-13)。

4. 樹高成長

a. カラマツ

12年生時のカラマツ林分の平均樹高はほぼ一定で、カラマツの立木本数による樹高成長の差は認められない。また、トドマツの立木本数による影響も認められない(表-2)。

34年生時の平均樹高もカラマツの立木本数による差は認められず、地形条件によるとみられる差は存在するものの、混植林分20林分中17林分の平均樹高は24.0~27.0 mの範囲内にある。また、トドマツの存在がカラマツの樹高成長に影響を与えていることは認められない(表-6)。

b. トドマツ

12年生時の平均樹高は、混植林分14林分中13林分で一斉林を上回っている。一斉林同士の平均樹高を比較すると、トドマツはカラマツの34%で、混植林分では霜害による枯損率の高い2つの林分を除いて、カラマツとトドマツの樹高比はこの値を上回っている。したがって、残存率と同様に初期の生育段階におけるカラマツの存在はトドマツの樹高成長を促進しているとみなすことができる(表-3)。

しかし、34年生時にはカラマツの立木本数が多い林分ほど、トドマツ平均樹高が低くなる傾向が認められる(表-7)。これはカラマツの存在がトドマツの光環境に影響を与え、その樹高成長を阻害しているためと考えられる。そこで、胸高断面積の場合と同じ考え方に基づき、光環境の指

表-12 カラムツの胸高断面積粗成長量とカラムツの相対幹距の関係 (12~21 年生)

Table 12. Relationship between gross basal area increment of Japanese larch and relative spacing of Japanese larch (12-21 yr. old)

胸高断面積 Basal area		枯損量 Mortality	粗成長量 Increment	対照区成長比* Ratio	相対幹距 (カラムツ) Relative spacing (larch)		
12 yr.	21 yr.	12-21 yr.	12-21 yr.		12 yr.	21 yr.	Average
A	B	C	D=B-A+C	E=D/17.31	F	G	H=(F+G)/2
m ² /ha	m ² /ha	m ² /ha	m ² /ha	%	%	%	%
21.90	27.50	11.71	17.31	100.00	20.59	26.09	23.34
8.36	13.85	1.63	7.12	41.13	44.96	27.31	36.13
6.51	14.69	1.11	9.29	53.69	51.39	30.74	41.06
8.63	21.40	0.21	12.98	75.01	48.80	27.42	38.11
14.27	17.59	6.79	10.11	58.41	34.55	25.74	30.14
13.91	18.28	5.20	9.57	55.29	32.22	21.98	27.10
8.02	16.34	1.87	10.19	58.90	35.50	23.35	29.42
14.37	15.80	8.29	9.72	56.15	31.89	25.56	28.73
16.01	23.56	4.29	11.84	68.42	28.71	18.90	23.81
10.42	21.13	1.93	12.64	73.02	31.02	19.20	25.11
17.60	22.13	8.21	12.74	73.63	26.40	19.65	23.03
15.88	19.32	7.84	11.28	65.16	26.84	21.53	24.19
13.17	18.48	4.95	10.26	59.28	32.22	21.98	27.10
19.35	22.66	8.16	11.47	66.27	23.76	17.89	20.82
14.03	23.69	3.95	13.61	78.64	30.11	19.75	24.93

* 対照区成長比とは期間中の一斉林の胸高断面積粗成長量 (17.31 m²/ha) に対する混植林分の胸高断面積粗成長量の割合である。

Ratio between lower trees and uniform stand in terms of gross basal area increment. This ratio is inversely proportion to relative spacing of upper trees.

相関関係: Correlation $E=1.18-0.021H$ 相関係数 $R=-0.825$

標としてカラムツの相対幹距を用い、トドマツの一斉林の平均樹高に対する、各混植林分の平均樹高の比がどのように変化するかを調べた。その結果、カラムツの相対幹距 (x) と一斉林との平均樹高比 (y) の間に

$$y=0.203+0.022x \quad \text{相関係数 } 0.964 \quad (7)$$

という高い正の相関関係が認められた。これはカラムツの相対幹距が大きい林分ほどトドマツの樹高成長が一斉林の状態に近くなることを意味している。

次に、トドマツの樹高曲線の形を表わす樹高曲線式のパラメータ (y) とカラムツの相対幹距 (x) の関係を表-14 に示した。この表からは、カラムツの相対幹距が増加するにしたがって、トドマツの樹高曲線の曲がり方が小さくなることがわかる。そして、両者の間には

$$y=1.821-0.036x \quad \text{相関係数 } -0.915 \quad (8)$$

という高い負の相関関係が認められる。これはカラムツの相対幹距の値が低くなるにつれて林分密度が高くなり、トドマツの樹高上位木と下位木間の光環境をめぐる競争が激しくなり、樹高成長の差が大きくなることを意味している。このことから二段林の上木の相対幹距が下木の樹高成長を示す有効な指標であることがわかる。

表-13 カラマツの胸高断面積粗成長量とカラマツの相対幹距の関係 (21~34 年生)

Table 13. Relationship between gross basal area increment of Japanese larch and relative spacing of Japanese larch (21-34 yr. old)

胸高断面積 Basal area		枯損量 Mortality	粗成長量 Increment	対照区成長比* Ratio	相対幹距 (カラマツ) Relative spacing (larch)		
21 yr.	34 yr.	21-34 yr.	21-34 yr.		21 yr.	34 yr.	Average
A	B	C	D=B-A+C	E=D/19.7	F	G	H=(F+G)/2
m ² /ha	m ² /ha	m ² /ha	m ² /ha	%	%	%	%
8.41	14.01	11.47	17.07	86.67	33.48	35.37	34.42
9.33	15.75	12.71	19.12	97.11	41.52	33.51	37.52
7.57	11.81	8.72	12.96	65.79	42.82	35.93	39.38
9.64	15.77	5.53	11.66	59.22	35.88	30.56	33.22
11.14	25.31	2.61	16.78	85.19	30.44	22.18	26.31
15.26	21.99	13.48	20.21	102.64	23.48	22.27	22.88
10.98	25.97	-0.80	14.19	72.06	32.60	20.88	26.74
11.32	22.37	6.07	17.11	86.90	28.95	23.21	26.08
9.70	14.51	9.77	14.58	74.03	30.30	29.54	29.92
11.48	24.31	4.94	17.77	90.24	30.00	21.25	25.62
8.19	18.39	8.66	18.85	95.73	37.70	25.97	31.84
10.19	22.79	8.24	20.84	105.81	29.44	21.56	25.50
13.44	31.80	9.99	28.35	143.96	23.22	18.63	20.93
11.02	26.42	6.79	22.20	112.69	28.52	20.57	24.54
13.25	32.48	7.55	26.78	135.98	25.40	17.48	21.44
14.67	25.27	11.92	22.51	114.30	25.09	21.22	23.16
21.13	25.55	9.21	13.63	69.19	19.20	19.44	19.32
9.92	17.46	12.16	19.70	100.00	29.99	27.64	28.82
12.98	26.07	10.58	23.66	120.15	25.66	22.58	24.12
23.47	38.61	2.00	17.14	87.00	21.95	17.68	19.81
17.41	34.05	5.24	21.89	111.13	24.90	15.85	20.37
24.40	32.74	9.54	17.88	90.80	20.22	15.29	17.75
14.71	31.28	2.36	18.93	96.12	25.02	17.39	21.21
17.11	35.33	7.71	25.93	131.64	24.72	16.79	20.75
19.14	34.60	6.05	21.51	109.22	23.11	15.87	19.49
26.52	28.60	13.66	15.74	79.93	22.94	21.64	22.29

* 対照区成長比とは期間中の一斉林の胸高断面積粗成長量 (19.7 m²/ha) に対する混植林分の胸高断面積粗成長量の割合である。

Ratio between lower trees and uniform stand in terms of gross basal area increment. This ratio is inversely proportion to relative spacing of upper trees.

相関関係: Correlation $E = 1.45 - 0.019 H$ 相関係数 $R = -0.469$

5. 樹冠半径

a. カラマツ

樹冠半径は12年生時においてのみ測定した。平均樹冠半径はカラマツの立木本数の少ない林分ほど大きくなる傾向が認められる (表-2)。これは1本当たりの生育空間が広くなるためと考えられる。しかし、トドマツの立木本数がカラマツの樹冠半径に影響を与えていることは認められない。

次に、林分面積に占めるカラマツの樹冠断面面積合計の割合は一斉林では139%で、生育空間を

表-14 トドマツの樹高曲線式のパラメータとカラマツの相対幹距の関係

Table 14. Relationship between height-diameter curve parameter of Saghalien fir stand and relative spacing of Japanese larch stand

立木本数/ha No. of trees per hectare		平均樹高(m) Average height	相対幹距 Relative spacing	平均樹高(m) Average height	パラメータ b^* h-d curve parameter b
トドマツ (A) fir	カラマツ (B) larch	カラマツ (C) larch	カラマツ (D) larch	トドマツ (E) fir	トドマツ (F) fir
1814	138	24.1	35.37	14.9	0.571
2022	164	23.3	33.51	14.0	0.560
1534	127	24.7	35.93	15.6	0.560
1097	305	25.8	22.18	11.3	0.963
1460	327	26.5	20.88	11.0	0.952
1170	249	27.3	23.21	11.3	0.787
1651	185	24.9	29.54	12.9	0.821
1191	309	26.8	21.25	10.4	1.061
1257	235	25.1	25.97	12.3	0.896
1230	301	26.7	21.56	11.6	1.025
1878	456	25.1	18.63	8.9	1.167
1704	377	25.0	20.57	11.2	0.982
988	477	26.2	17.48	10.3	1.315
1626	359	24.9	21.22	10.6	1.058
1369	191	26.2	27.64	13.5	0.980
1146	302	25.5	22.58	12.3	1.042
337	581	23.5	17.68	8.9	1.344

* 樹高曲線式 $H=1.3+a \times D^b$ のパラメータ b の値
 parameter b of h-d curve formula $H=1.3+a \cdot D^b$ (STOFFELS' s formula)
 相関関係 (correlation) $F=1.821-0.036D$ $R=-0.915$

満度に利用しているということが出来るが、混植林分の 500 本区では 41%, 1000 本区で 68%, 1500 本区で 71% となり、混植林分では十分に生育空間を利用している状態とはいえない。

b. トドマツ

トドマツの樹冠半径は、一斉林と混植林分との間には顕著な差は認められず、カラマツの立木本数による差も認められない(表-3)。このことから、12 年生時ではカラマツの存在はトドマツの樹冠半径に影響を与えていないということが出来る。また、トドマツの立木本数による差も認められない。これはトドマツが水平方向よりも垂直方向の成長に精力を注いでいるためと思われる。すなわち、この時点では枝を横に伸ばすよりも、より高く伸びることの方が重要であることを示唆している。

6. 材 積 成 長

a. カラマツ

12 年生時の林分材積は胸高断面積合計と同様に、立木本数による差が顕著に現われており、立木本数の多い林分ほど林分材積が大きい。また、トドマツの立木本数による影響も認められない(表-2)。

21 年生時においても間伐前の林分材積は、立木本数が多い林分ほど大きい。しかし、単木材積

は立木本数が少ない林分ほど大きくなっており、密度効果が認められる。トドマツとの材積合計はカラマツ 1500 本区で最も大きくなっているが、カラマツ一斉林のカラマツのみの林分材積を下回っている。このことから、21 年生時までは一斉林の方が効率よく材積成長を行なっているといえることができる (表-4, 5)。

34 年生時における林分材積は、21 年生時と同様にカラマツの立木本数が多い林分ほど大きな傾向がみられるが、トドマツとの材積合計ではほとんど差がなくなっている (表-6)。これはカラマツとトドマツの樹高差が大きくなりトドマツにとっての光環境が改善され、生育空間を十分に利用することができるようになったためと考えられる。その結果、健全な生育を遂げた林分では、各林分とも $450 \sim 470 \text{ m}^3/\text{ha}$ の林分材積を示し、一斉林との成長効率の差はなくなっている。ただし、カラマツとトドマツとの間の材積成長の配分割合は林分によって異なっている。これは、断面積成長と樹高成長の分析結果から判断して、カラマツの相対幹距が大きな影響を与えているものと考えられる。

b. トドマツ

12 年生時にはトドマツは材積の計算ができるほどの大きさにはなっていないため、21 年生時と 34 年生時の林分材積について調べた。

21 年生時には、トドマツの単木材積に大きな差はなく、立木本数の差がそのまま林分材積の差となって現われている。(表-5)。

34 年生時には、カラマツ 1000 本区、1500 本区では一斉林の半分以下の単木材積である。これはカラマツの存在がトドマツの単木材積に影響を与えているためと考えられる。したがって、トドマツの林分材積はカラマツの林分材積が多い林分ほど小さくなっている (表-7)。

7. 相対照度

相対照度の測定は 12 年生時に 5 つの林分において実施した。相対照度と林分特性値との関係は表-15 のとおりである。この表からは、PLOT-1 を除いて地上高 10 cm よりも 1 m の方が相対照度の値が低い傾向にあることがわかる。林分因子との関係では、平均幹距の大きい林分の方が相対照度の値が高い傾向があることがわかる。また、平均樹高に対する平均幹距の比である相対幹距も、上木であるカラマツの相対幹距を指標に取れば、相対照度と正の相関があることがわかる。しかし、この測定はトドマツの樹冠の高さよりも低い位置で行われたものであるため、カラマツとトドマツの両方の影響を受けているものと考えられる。

相対照度は下木であるトドマツの生育環境の指標として、有効であるとされているが、そのためにはトドマツの平均樹高である地上 4 m 以上の高さで測定を行う必要がある。表-16 は 1 時間ごとの相対照度の平均値を示したものであるが、トドマツの立木本数の多い PLOT-3 と PLOT-5 では 10 時台の相対照度の値が高くなっているが、これは日光の入射角が浅いことによるものと考えられる。相対照度の標準偏差は明るい林分ほど大きく、照度の低い林分でも変動係数の値は高くなっている。このように相対照度は測定に要するエネルギーの割には、同一林分内でも、季節や時間帯などの測定の時期、樹木からの距離など測定位置、天候による変動が大きく、一般の経営林の林内環境管理の指標としては現実的でないと思われる。

表-15 相対照度と林分特性値の関係
Table 15. Relationship between relative illuminance and stand characteristics

PLOT	相対照度 (%) Relative illuminance		立木本数 No. of trees per hectare		平均幹距 (m) Tree distance		平均樹高 (m) Average stand height		樹冠半径 (cm) Crown radius		相対幹距 (%) Relative spacing	
	10 cm*	1 m**	カラマツ larch	トドマツ fir	カラマツ larch	トドマツ fir	カラマツ larch	トドマツ fir	カラマツ larch	トドマツ fir	カラマツ larch	トドマツ fir
1	8.63	9.32	2275	0	2.09	10.18	—	—	139.4	—	20.6	—
2	21.20	18.74	1000	700	2.43	10.20	3.80	70.1	137.0	31.0	99.5	99.5
3	4.86	4.05	900	1825	1.91	10.35	4.41	132.6	73.2	32.2	53.1	53.1
4	25.81	20.53	475	1475	2.26	10.21	3.44	166.5	63.1	44.9	75.7	75.7
5	3.12	2.94	900	1925	1.88	11.61	3.00	56.9	168.2	28.7	76.0	76.0

* 地上高 10 cm: height of measurement is 10 cm above ground

** 地上高 1 m: height of measurement is 1 m above ground

表-16 1時間ごとの相対照度の推移

Table 16. Change of relative illuminance

PLOT	10:00-10:15		11:00-11:15		12:00-12:15		13:00-13:15		14:00-14:15		15:00-15:15		平均 Ave.	分散 Var.	標準偏差 S.D.	変動係数 c. v.
	地上高 10 cm: Height of measurement is 10 cm above ground	地上高 1 m: Height of measurement is 1 m above ground	地上高 10 cm: Height of measurement is 10 cm above ground	地上高 1 m: Height of measurement is 1 m above ground	地上高 10 cm: Height of measurement is 10 cm above ground	地上高 1 m: Height of measurement is 1 m above ground	地上高 10 cm: Height of measurement is 10 cm above ground	地上高 1 m: Height of measurement is 1 m above ground	地上高 10 cm: Height of measurement is 10 cm above ground	地上高 1 m: Height of measurement is 1 m above ground	地上高 10 cm: Height of measurement is 10 cm above ground	地上高 1 m: Height of measurement is 1 m above ground				
1	8.62	8.63	8.63	8.45	9.31	8.25	8.56	8.56	8.63	8.63	13.476	3.671	0.425			
2	19.47	21.46	21.46	22.51	23.05	21.19	19.52	19.52	21.20	21.20	84.450	9.190	0.433			
3	8.93	4.22	4.22	3.78	3.89	4.48	3.89	3.89	4.86	4.86	13.154	3.627	0.746			
4	22.18	25.24	25.24	25.77	28.09	22.98	30.58	30.58	25.81	25.81	89.172	9.443	0.366			
5	5.10	5.18	5.18	3.89	1.93	1.49	1.11	1.11	3.12	3.12	6.807	2.609	0.837			
地上高 1 m: Height of measurement is 1 m above ground																
1	9.24	9.48	9.48	9.35	9.57	8.87	9.42	9.42	9.32	9.32	20.586	4.537	0.487			
2	18.20	19.05	19.05	18.90	20.17	18.88	17.23	17.23	18.74	18.74	49.628	7.045	0.376			
3	7.55	3.85	3.85	2.89	3.76	3.31	2.92	2.92	4.05	4.05	12.373	3.518	0.869			
4	19.53	20.95	20.95	18.48	20.54	20.12	23.56	23.56	20.53	20.53	58.751	7.665	0.373			
5	5.00	5.12	5.12	3.62	1.53	1.35	1.02	1.02	2.94	2.94	6.511	2.552	0.868			

8. 樹 幹 形

カラマツ 9 本, トドマツ 9 本の試料木の樹幹解析結果に基づく相対幹形を表-17 に示す。樹木の完満度は樹冠形状を推定する手がかりとなる。篠崎ら⁴⁾のパイプモデルによれば, 枝下高の高い木の方が均一な成長量を配分される部位が多くなるため, 樹幹の高い部位まで成長量が配分され, 樹幹形は完満となる。そこで, 大きさの異なる試料木の完満度の指標として正形数と相対直径を用いることにする。

正形数は樹高の $1/10$ の高さの直径である基準直径を直径とする円を底面とし, 樹高を高さとする基準円柱の体積に対する幹材積の比であり, 相対直径は基準直径に対する任意の高さの直径の比である。各試料木の樹幹解析結果に 5 次式の幹曲線式をあてはめ, 各相対高の直径を計算し, 正形数と相対直径を求めた。

a. カラマツ

34 年生時の正形数を比較すると, カラマツの立木本数の多い林分内の樹木の方が正形数や $\eta_{0.3}$ や $\eta_{0.5}$ などの樹幹上部の相対直径が大きくなる傾向が認められる。これは樹幹形がより完満であることを意味しており, 枝下高が高く樹冠があまり下の方でないものと推定することができる。その理由は, カラマツの立木本数の多い林分では隣接するカラマツとの相対的な関係から平均幹距が小さくなるため, 側方への枝の展開が少なくなり, 光合成による生産活動が樹冠上部に集中するためと考えられる。これに対して, 隣接するカラマツとの距離が大きき場合には, 側方への枝の展開も大きくなり, 樹冠下部における生産割合も高くなるため, 樹幹上部の肥大成長が下部と比較して小さくなる。

しかし, 最低 10 年間の正形数の増減を見ると, カラマツ 1500 本区の 3 本はいずれも正形数の値が増加しているのに対し, 他の 6 本は微増もしくは減少している。また, $\eta_{0.3}$ の相対直径についても同様の傾向がみられる。これは, 林分内のトドマツの存在が影響を与えているものと考えられる。1500 本区ではトドマツの本数は 1146 本/ha と 500 本区の 2022 本/ha より少なく, トドマツの平均樹高も 12.25 m で, 500 本区の 13.98 m と比べて低い。したがって, トドマツが適度な枝打ち効果を果たしているものと考えられる。これに対して, 500 本区のトドマツは, 一斉林のカラマツ同様に樹幹上部の肥大成長を阻害しているものと考えられる。

b. トドマツ

34 年生時の正形数は, カラマツに比べてやや小さいが, トドマツ, カラマツの立木本数による差は認められない。最近 10 年間の変化を見るとトドマツの一斉林では 3 本とも増加しているのに対して, カラマツ 500 本区では減少している。これはトドマツの樹高成長速度の差が影響しているように思われる。すなわち, カラマツ 500 本区では比較的小トドマツの樹高成長が旺盛なため, 樹幹上部の肥大成長が相対的に小さくなるのに対して, 一斉林のトドマツは樹高成長に比べて肥大成長の方が旺盛なためと考えられる。

IV. ま と め

12 年生までの初期の生育期間においては, 混植は気象条件を緩和し生存条件に良い影響を与え, トドマツ・カラマツの双方にとって個体生存率の面で互いに良い影響を与え合っている。単木の直径成長の面では, カラマツの立木本数の多い林分で密度効果によるトドマツの平均直径への影響が認められるが, 林分全体の断面積成長の面では, カラマツが影響を与える段階に至って

表-17 樹幹解析木の相対幹形
Table 17. Relative stem form of sample trees

試料木番号* No. of sample trees	34 年生 (34 yr.)				24 年生 (24 yr.)			
	正形数**** Normal form factor	相対直径** Relative diameter			正形数**** Normal form factor	相対直径** Relative diameter		
		$\eta_{0.3}$ ***	$\eta_{0.5}$ ***	$\eta_{0.7}$ ***		$\eta_{0.3}$ ***	$\eta_{0.5}$ ***	$\eta_{0.7}$ ***
カラマツ 500 本, トドマツ 4000 本植栽区 (in a stand <i>Larix</i> 500/ha, <i>Abies</i> 4000/ha planted)								
LA-021	0.489	0.435	0.673	0.835	0.496	0.435	0.680	0.855
LA-022	0.518	0.425	0.728	0.905	0.510	0.437	0.721	0.886
LA-023	0.488	0.411	0.685	0.849	0.518	0.457	0.714	0.878
平均	0.498	0.424	0.695	0.863	0.508	0.443	0.705	0.873
カラマツ 1500 本, トドマツ 2000 本植栽区 (in a stand <i>Larix</i> 1500/ha, <i>Abies</i> 2000/ha planted)								
LA-191	0.522	0.497	0.727	0.855	0.502	0.469	0.708	0.835
LA-192	0.531	0.478	0.735	0.878	0.503	0.443	0.706	0.854
LA-193	0.531	0.485	0.743	0.892	0.507	0.434	0.707	0.883
平均	0.528	0.487	0.735	0.875	0.504	0.449	0.707	0.857
カラマツ 3000 本植栽区—斉林 (in a uniform <i>Larix</i> stand 3000/ha planted)								
LA-331	0.537	0.498	0.752	0.895	0.553	0.511	0.759	0.911
LA-332	0.574	0.574	0.795	0.917	0.573	0.553	0.793	0.927
LA-333	0.543	0.513	0.756	0.883	0.546	0.513	0.753	0.883
平均	0.551	0.528	0.768	0.898	0.557	0.526	0.768	0.907
カラマツ 500 本, トドマツ 4000 本植栽区 (in a stand <i>Larix</i> 500/ha, <i>Abies</i> 4000/ha planted)								
AB-059	0.503	0.467	0.702	0.855	0.513	0.467	0.720	0.879
AB-062	0.493	0.437	0.692	0.850	0.540	0.505	0.768	0.889
AB-071	0.505	0.462	0.704	0.858	0.505	0.431	0.690	0.885
平均	0.500	0.455	0.699	0.854	0.519	0.468	0.726	0.884
カラマツ 1500 本, トドマツ 2000 本植栽区 (in a stand <i>Larix</i> 1500/ha, <i>Abies</i> 2000/ha planted)								
AB-523	0.491	0.459	0.686	0.857	0.479	0.417	0.683	0.856
AB-525	0.544	0.534	0.747	0.903	0.549	0.540	0.764	0.911
AB-540	0.484	0.446	0.672	0.844	0.459	0.446	0.648	0.811
平均	0.506	0.480	0.702	0.868	0.496	0.468	0.698	0.859
トドマツ 3000 本植栽区—斉林 (in a uniform <i>Abies</i> stand 3000/ha planted)								
AB-574	0.515	0.458	0.714	0.865	0.477	0.386	0.661	0.857
AB-578	0.497	0.424	0.687	0.861	0.494	0.426	0.691	0.854
AB-557	0.504	0.453	0.700	0.841	0.461	0.401	0.643	0.820
平均	0.505	0.445	0.700	0.856	0.477	0.404	0.665	0.844

* 試料木の番号の LA はカラマツ AB はトドマツ.

"LA" means "*Larix kaempferi*", "AB" means "*Abies sachalinensis*" in sample tree number

** 相対高 0.9 H の位置の直径 (基準直径) に対する各相対高の位置の直径の比.
"relative diameter" is ratio of diameter at each relative height to standard diameter at 0.9 H (9/10 of tree height from top end)

*** $\eta_{0.3}$, $\eta_{0.5}$, $\eta_{0.7}$ はそれぞれ梢端から樹高の 3/10, 5/10, 7/10 離れた部位の相対直径である.
" $\eta_{0.3}$ ", " $\eta_{0.5}$ ", " $\eta_{0.7}$ " means relative diameter, for example " $\eta_{0.3}$ " means relative diameter at 0.3 H (3/10 of tree height from top end)

**** 基準直径を底面とし, 樹高を高さとする基準円柱の体積に対する幹材積の比.
"normal form factor" is ratio of stem volume to standard column

いない。これはカラマツの樹冠の発達が十分でなく、生育空間を満度に利用していないため、トドマツの光環境が一斉林と変わらない状態であることを示している。

また、樹高成長の面では、環境条件の緩和によりカラマツの存在がトドマツの樹高成長を促進している。ただし、この関係は光の透過性が高く落葉性があるカラマツと、幼齢時における光要求度が低く耐陰性の高いトドマツの間に成り立つもので、必ずしも一般性があるとはいえないことに注意するべきである。

21年生以降ではカラマツの樹高成長に伴い、トドマツの生育環境が厳しくなり、その成長への影響が認められる。特に、林分全体の成長量の面で胸高断面積合計、平均樹高がカラマツの林分密度に応じて、成長が阻害されていることが確認される。しかし、34年生の林分材積をトドマツとカラマツを合計してみると、健全林分ではほぼ同じ値を示しており、カラマツの林分密度により両者の材積配分割合が異なることがわかった。

一般的に、二段林の下木の生育環境を評価するための尺度として相対照度が用いられているが、測定に要するエネルギーの割には、同一林分内でも、季節や時間帯など測定の時期、樹木からの距離など測定位置、天候による変動が大きい。

本報告でも調査したとおり、平均幹距の大きい林分の方が相対照度の値が高い傾向があるので、上木の相対幹距をこれに代わる下木の光環境の尺度として用いることが考えられる。そこで、上木の相対幹距と下木の胸高断面積粗成長量の関係を12年生から21年生までの9年間で21年生から34年生までの13年間について調べたところ、両者の間に相関関係があることが認められた。さらに、断面積粗成長量の同期間の一斉林の成長量との比で表わすと、2つの期間中の直線回帰式の係数がほぼ同じ値を示すことがわかった。また、34年生トドマツ一斉林の平均樹高に対する混植林分の平均樹高の比がカラマツの相対幹距と高い相関を持つことがわかった。

これらのことから、予測しようとする期間中のトドマツ一斉林の成長量が与えられれば、回帰式を用いてカラマツの相対幹距から期間中の混植林分の成長量を予測することができる。また、樹幹形の解析から、カラマツは平均幹距が小さい林分ほど上部直径の成長割合が高くなり、トドマツが適度な枝打ち効果を果たし、完満な材が得られることがわかった。

これらの知見を踏まえて、トドマツ・カラマツ二段林の成長予測モデルを開発することが可能となった。このようなモデルが作成されれば、シミュレーションによって、上木と下木それぞれの生産目標に応じた、本数の管理が可能となる。すなわち、上木のカラマツをいつ、どれだけ間伐すれば、トドマツがどのように成長し、カラマツの樹幹形がどのように変化するかを予測することができる。

以上、北海道のトドマツ・カラマツ二段林の調査結果について整理した。植栽樹種による違いはあるものの、ここで述べた相対的な成長関係には普遍性があり、他の地域においても利用できるものと思われる。

要 旨

東京大学北海道演習林において1956年から施業実験がなされているカラマツ・トドマツ二段林について、34年生までの成長経過の調査結果を解析した。その結果、二段林の上木と下木の成長の関係について以下のことが明らかになった。

- 1) 12年生までの初期の生育段階では気象条件を緩和し、生存条件に良い影響を与え合っ

ていること。

2) 21 年生以降では上木の樹高成長に伴い、下木の生育環境が低下し、下木の成長が阻害されること。

3) 相対照度に代わる二段林の光環境の尺度として、上木の相対幹距が有効であること。

4) 下木の断面積粗成長量を同期間の一斉林の成長量との比で表わすと上木の相対幹距の一次関数で近似でき、その係数がどの生育期間においても一定であること。

5) 下木の平均樹高も一斉林の平均樹高との比で表わすと上木の相対幹距の一次関数で近似できること。

これらのことから、予測しようとする期間中の下木の一斉林の成長量がわかれば、上木の相対幹距との回帰式を用いて二段林の成長を予測することが可能となった。

このような二段林の成長予測モデルが作成されれば、シミュレーションによって、上木と下木それぞれの生産目標に応じた、本数の管理が可能となる。ここで述べた相対的な成長関係には普遍性があり、他の地域においても利用できるものと思われる。

キーワード：二段林，成長予測，カラマツ，トドマツ，相対幹距

引用文献

- 1) 岩本巳一郎・西田信雄：カラマツ・トドマツ混植の成績と問題点。日林北支講，17，53-56，1968.
- 2) 南雲秀次郎・箕輪光博：測樹学。243 pp，地球社。東京。1990.
- 3) 西沢正久：森林測定。348 pp，農林出版。東京。1972.
- 4) SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI, K. and KIRA, T.: A quantitative analysis of plant form —the pipe model theory 1. Basic analyses. Jpn. J. Ecol., 14, 97-105, 1964.

(1992 年 4 月 27 日受理)

Summary

A project, carried on in the Tokyo University Forest in Hokkaido since 1956, to research the growth process of two-storied artificial stands consisting of Japanese larch (*Larix kaempferi*) and Saghalien fir (*Abies sachalinensis*) and to perform some studies on them, has made clear the following.

1) In the first growing stage until 12 years old, the two species beneficially influence each other by relieving weather conditions.

2) After 21 years old, in proportion to height growth of the upper trees, environmental conditions for the lower trees deteriorates and their growth is obstructed by the upper ones.

3) Relative spacing is an effective index of the light environment instead of relative light illuminance in a two-storied stand.

4) A ratio of the gross basal area increment of the lower trees to that of a uniform stand is directly proportional to relative spacing of the upper trees and the parameter of this linear function is constant in any growing period.

5) A ratio of the average height of the lower trees and a uniform stand is also a linear function of relative spacing of the upper trees.

From the above results; if the increment of a uniform stand of the lower species is given, we are able to predict the growth of a two-storied stand using the linear function of relative spacing of the upper species. Using the growth prediction model, we are able to

control the number of upper trees according to the timber production goal. Because the above relative growth model is universal, we can apply it to different regions.

Key words: Two-storied stand, Growth prediction, *Abies sachalinensis*, *Larix kaempferi*, Relative spacing