

交雑育種苗の生長解析に関する研究

1996年度～2000年度（県単）

吉田 和広 手塚 朗¹ 小林 元男
竹内 英男² 熊川 忠芳 大内山道男³

要 旨

スギ精英樹次世代化の基礎資料を得ることを目的として、精英樹同士の交配で得られた交雑育種苗を山地に植栽し、生長量を調査した。その結果、伸長生長（樹高）と肥大生長（胸高直径）には相関があった。また、各試験地における生長の優良な組み合わせは異なっており、立地条件が生長に与える影響は大きかった。そこで、数学的な修正および土壌型による試験地の分割により、立地の影響を除去する方法について検討した。その結果、各試験地における組み合わせの樹高による順位には一貫性があり、立地の影響が除去されたことが確認できた。修正後の結果から、生長の良い組み合わせとして、南設楽3号×北設楽1号と東加茂4号×北設楽1号、北設楽3号×北設楽1号が選抜された。

I はじめに

スギは主要な造林樹種で、各地で生長等の形質から選抜された精英樹が推奨品種として植栽されている。しかし、精英樹は選抜から40年近くが経過し、その間の社会情勢の変化から次世代の精英樹選抜が急務となっている。

そこで、精英樹同士の交配で得られた交雑育種苗を山地に植栽し、生長量を調査・解析することにより精英樹次世代化の基礎資料を得ることを目的として本研究を行った。

本稿は、「交雑育種に関する研究」および「交雑育種苗の生長解析に関する研究」をとりまとめたもので、各年度の詳細についてはそれぞれの報告を参照して頂きたい。

II 材料

「交雑育種に関する研究」(5)で得られた交雑苗(75組み合わせ)を植栽した6試験地(賀茂県有林A、B、センター試験林、東加茂模範造林地、山吉田財産区有林A、B)(図-1～6)で生長量調査を行った。

III 生長量調査

1. 方法

1996年から毎年11月下旬から12月上旬に調査を行った。調査項目は、樹高、根元直径、胸高直径で、樹高は5 cm単位、根元直径および胸高直径は1 mm単位で測定した。得られたデータは表計算ソフト(Microsoft Excel)および統計ソフト(エクセ

Kazuhiro YOSHIDA, Akira TEZUKA, Motowo KOBAYASHI, Hideo TAKEUCHI, Tadayoshi KUMAGAWA, Michio OHUCHIYAMA : Growth analysis of sugi crossbreeds.

1 : 現農林水産部林務課、2 : 1999年3月退職、3 : 2000年3月退職

ル統計)を用いて処理した。1996年は全ての試験地、1997年以降は東加茂模範造林地を除いた5試験地のデータを用い、肥大生長(根元直径または

胸高直径)をX軸、伸長生長(樹高)をY軸とするX-Yプロットを作成し、交雑組み合わせによる生長型の比較を行った。また、1997年以降は、

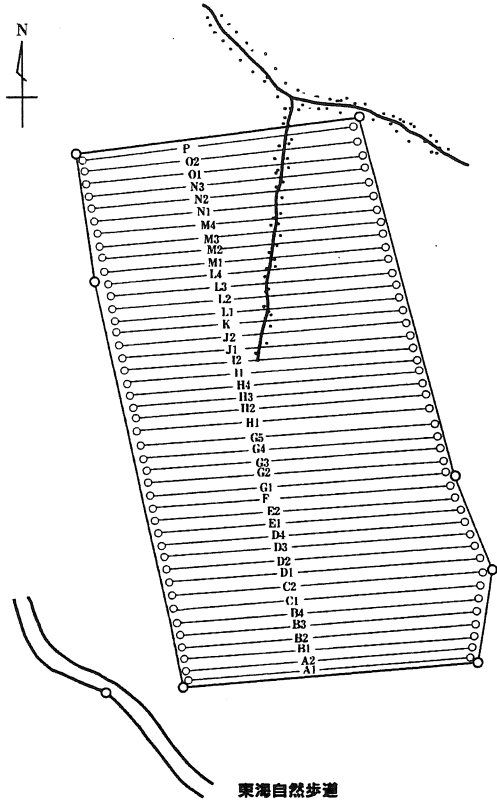


図-1 賀茂県A試験地

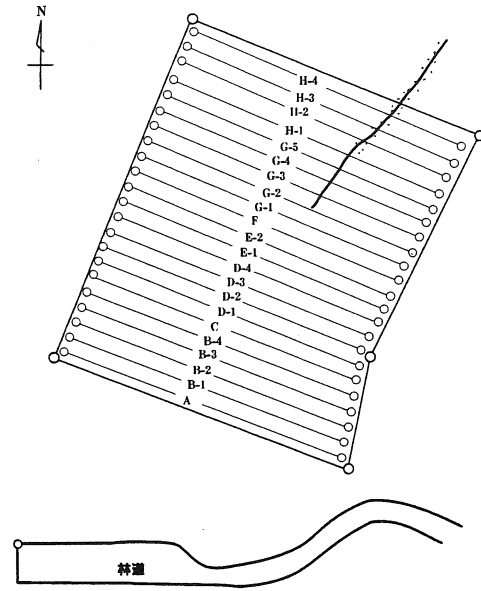


図-2 賀茂県B試験地

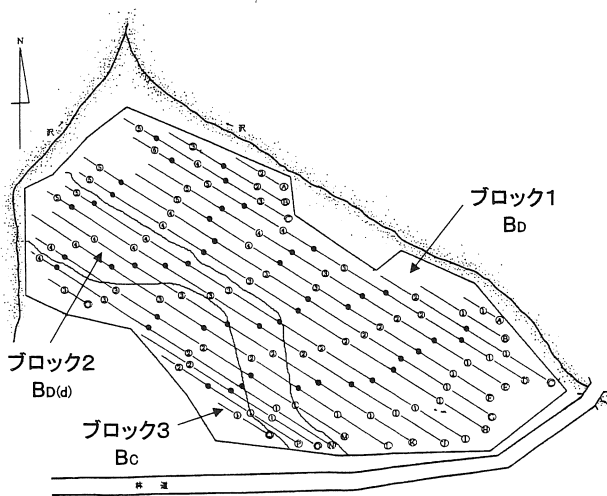


図-3 センター試験地

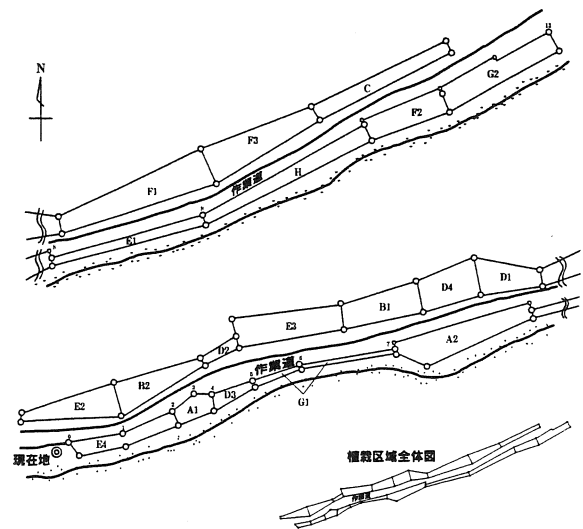


図-4 東加茂模範造林試験地

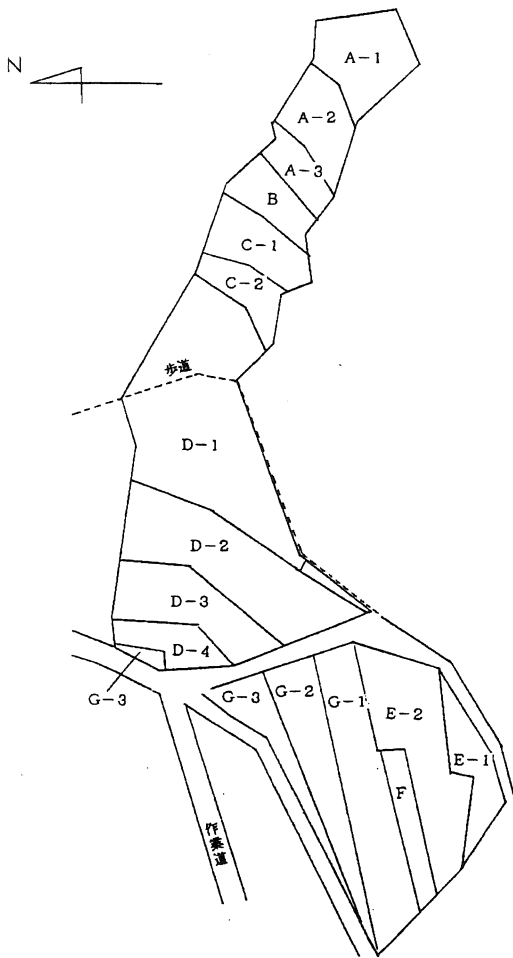


図-5 山吉田財産区A試験地

最も多くの組み合わせが植栽されている賀茂県A試験地とセンター試験地について、各組み合わせを樹高の高い順に順位を付けた。

2. 結果と考察

各試験区における X - Y プロットは、図-7のとおりである。図のように、各試験地とも樹高と胸高直径の間には有意に相関が認められた ($R > 0.8$)。このため、以下の生長量の検討は樹高を要因として行った。

また、賀茂県 A 試験地とセンター試験地に共

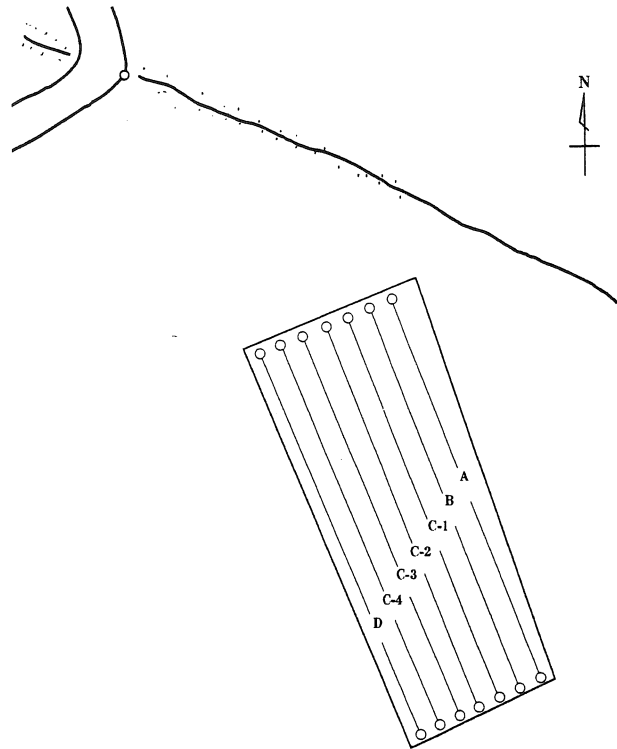


図-6 山吉田財産区B試験地

通して植栽されている39組み合わせについて X - Y プロットし (図-8)、判別分析 (2) を行ったところ、線形判別関数でグループ分けが可能であった (正答率82.1%)。すなわち、賀茂県 A 試験地とセンター試験地では同じ組み合わせでも生長に違いがある可能性があり、このことは各試験地の立地条件によるものと考えられた。

賀茂県 A 試験地とセンター試験地に共通して植栽されている39組み合わせについて、平均樹高による順位付けを行った結果を表-1に示す。各試験地の順位について、Kendall の一致係数を求

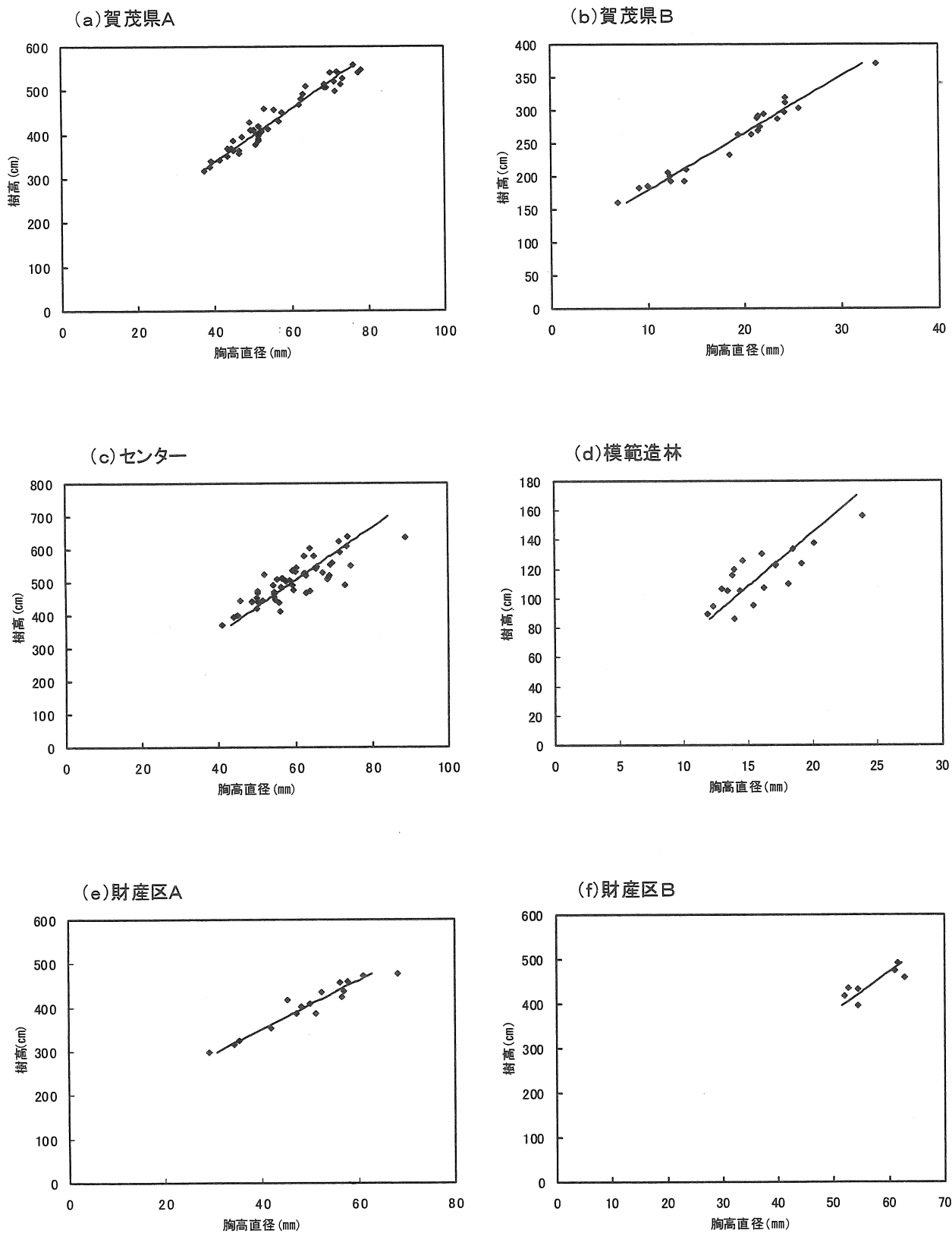


図-7 各試験地における樹高と胸高直径の関係

※各組み合わせの平均胸高直径と平均樹高をその組み合わせの測定値としてプロットしてある

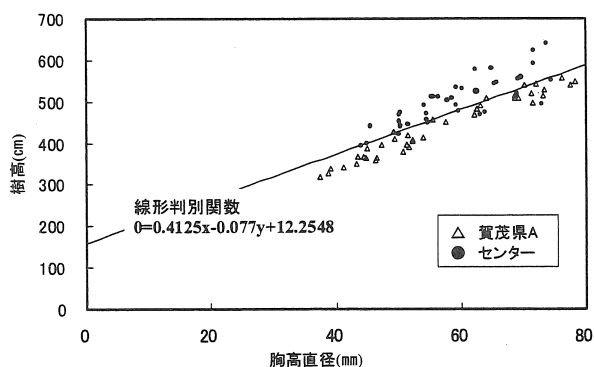


図-8 賀茂県Aとセンター試験地に共通して植栽されている組み合わせの樹高と胸高直径の関係

め、検定を行ったところ(2)、順位に相関があるとはいえなかった。このこともやはり、立地条件によって生長に違いが出たものと考えられた。

賀茂県 A 試験地で最も平均樹高が高い南設楽 1号×天竜7号、センター試験地で最も平均樹高が高い南設楽3号×北設楽1号、両試験地ともに平均樹高が高い岡崎1号×新城5号の3組み合わせについて、植栽後の樹高変化を示したのが図-9である。センター試験地では、S字型の典型的な成長曲線の立ち上がりを示しているのに対して、賀茂県 A 試験地では早くも頭打ちの傾向を示している。このことは賀茂県 A 試験地の植栽間隔が1.6mとセンター試験地の1.8mより狭く、また、賀茂県 A 試験地の生長の立ち上がりが早かったため、競争による共倒れ現象が起きていると思われるが、本来、本数密度効果によって伸長生長の促進と肥大生長の抑制が起きるため(4)、この頭打ち現象の原因は、下刈り等の施業や立地条件等が複雑に絡んでいると思われる。しかし、南設楽1号×天竜7号は良好な生長を示しているため、それぞれの条件に適合した組み合わせを植栽することが重要であると考えられる。

表-1 共通組み合わせの平均樹高と各試験地内の順位

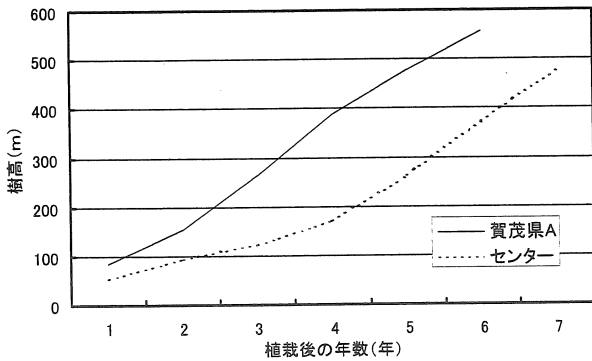
組み合わせ (♀ × ♂)	賀茂県A		センター	
	平均樹高	順位	平均樹高	順位
南1号×天7号	557.8	1	474.5	26
北8号×北2号	548.2	2	546.1	9
北2号×東2号	542.5	3	525.6	14
岡1号×新5号	540.3	4	622.2	2
南1号×額2号	539.4	5	394.2	39
北8号×東11号	527.3	6	534.4	11
北2号×南2号	520.3	7	452.8	32
北2号×岡1号	514.0	8	526.0	13
北4号×北8号	514.0	9	492.5	22
南3号×東4号	508.6	10	510.0	18
北4号×東6号	507.3	11	443.9	34
岡1号×天18号	507.2	12	470.0	28
北4号×北2号	497.5	13	513.3	16
新5号×天18号	491.8	14	591.0	3
北2号×新5号	480.8	15	553.3	7
北4号×東11号	468.7	16	441.4	36
北3号×南3号	455.9	17	578.0	5
東4号×東8号	451.1	18	443.0	35
東10号×北3号	428.1	19	509.4	19
北3号×北1号	419.2	20	511.1	17
南3号×北1号	413.1	21	638.3	1
北3号×東4号	410.0	22	551.0	8
天18号×東7号	407.9	23	520.5	15
東4号×北1号	405.3	24	506.5	20
東4号×北6号	397.0	25	400.0	38
北7号×北3号	395.6	26	476.5	25
天18号×北5号	390.5	27	456.5	31
東7号×北3号	386.3	28	580.0	4
天18号×北7号	377.9	29	448.0	33
北7号×東10号	368.1	30	472.5	27
北3号×北6号	367.8	31	491.3	23
北6号×北1号	364.7	32	466.9	30
天18号×北3号	362.9	33	558.5	6
南3号×北6号	357.8	34	532.0	12
北5号×東7号	350.3	35	502.5	21
東7号×東10号	341.3	36	422.0	37
北5号×北3号	338.8	37	542.5	10
北5号×北7号	327.1	38	467.5	29
北5号×東10号	317.9	39	490.0	24

※南：南設楽、北：北設楽、東：東加茂、岡：岡崎、額：額田、新：新城、天：天竜 (以下同様)

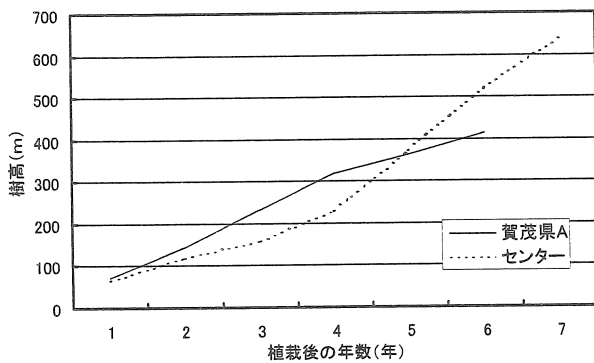
IV 立地の影響の除去

前項の結果から、立地の影響は無視できないほど大きく、測定データのみで議論することが困難であることが明らかになった。そこで、立地の影響を除去するために以下の処理を行ったデータについて順位付けを行った(図-10)。

(a) 南設楽 1号 × 天竜 7号



(b) 南設楽 3号 × 北設楽 1号



(c) 岡崎 1号 × 新城 5号

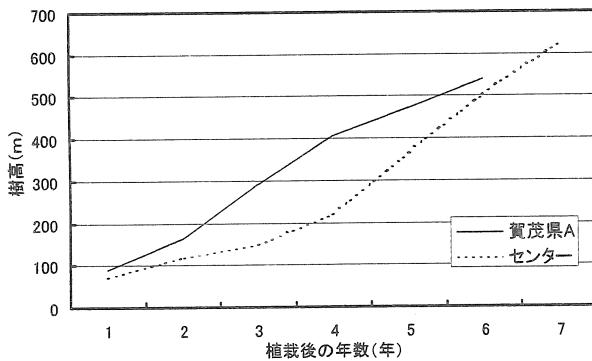


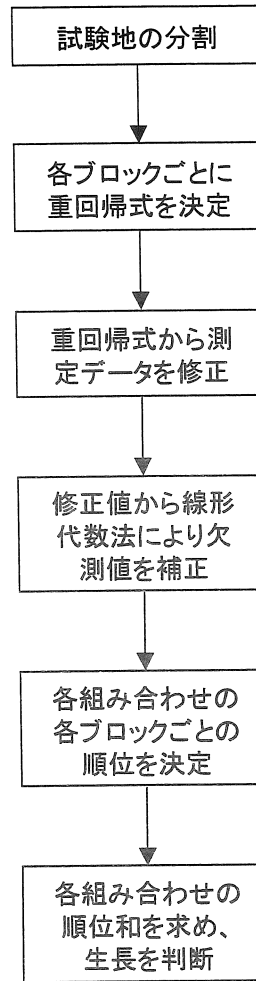
図-9 植栽後の経過年数による樹高変化

1. 方法

(i) 賀茂県有林A

現地調査および得られたデータから、立地の影響を勘案して試験地を6ブロックに分割し(図-11)、各ブロックごとに重回帰式を用いる方法(1)により修正を行った。今回用いた変数は、組み合わせ番号を X_1 、各組み合わせ内の個体番

(a) 賀茂県A試験地



(b) センター試験地

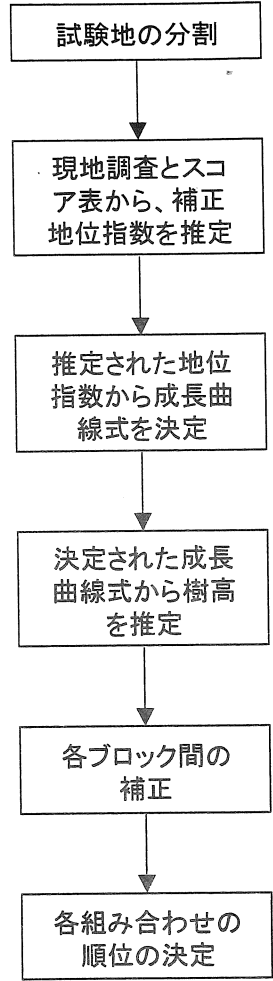


図-10 立地の影響を除去する処理の流れ図

号を X_2 、原点からその象限に引いた対角線に直交する変化を X_3 、 X_3 に直交する(対角線に平行な)変化を X_4 とした(図-11)。重回帰式を決定する項として、定数、 X_1 から X_4 までの1次から4次および交互作用として X_1 から X_4 のうち2つの掛け合わせ(ex. $X_1 X_2$, $X_1 X_3$, $X_2 X_4$...)を投入し、変数減少法によって重回帰式を決定した。決定された重回帰式を用いて欠損値も含めて各ブロックごとの修正値を求めた。

1試験区を6ブロックに分けたため、1つの組み合わせについてはそれぞれ4ブロック分の欠測値が生じる(図-11)。この欠測値については線形代数法(2, 10)を用いて補正を行った。プロ

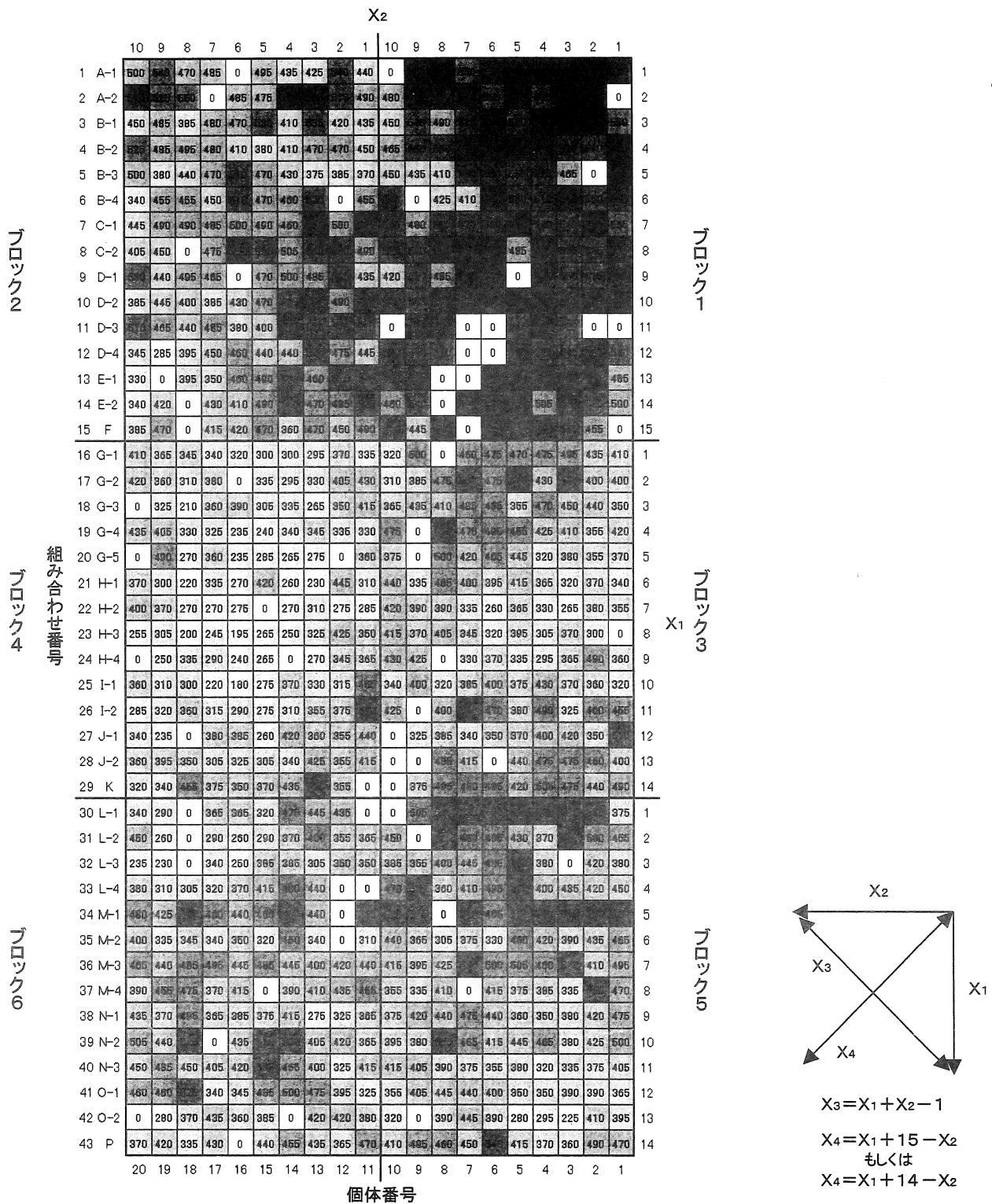


図-11 賀茂県A試験地の測定データを図化したものおよび重回帰式の変数の定義

※1マスは1個体を表し、マス内の数字は樹高を示している。また、色の濃いほうが樹高が高い。さらに、試験地を分割したため、例えば組み合わせ番号1(A-1)の個体はブロック1, 2にはあるが、ブロック3~6にはないため4ブロック分の欠測値が生じる。

ック i の組み合わせ番号 j のデータを Y_{ij} とすれば、

$$Y_{ij} = m + b_i + s_j + e_{ij}$$

なる線形式で表される。このとき、 m は全データの平均値、 b_i はブロック i の偏差効果、 s_j は組み合わせ番号 j の偏差効果、 e_{ij} はデータの誤差である。実際のデータにこの式を当てはめ、最小 2 乗法により変数 b_i 、 s_j を推定し、各欠測値を補正した。

この補正したデータに基づいて、各組み合わせの各ブロック内の順位を III と同様に決定し、その順位和によって、生長の良し悪しを推定した。

(ii) センター試験地

現地調査から、試験地を土壌型によって 3 ブロックに分割した (図-3)。スギ林地位指数推定要因スコア表 (9) を適用するために、スコア表と小林ら (3) の結果を比較し、試験林におけるスコア表補正値を求めた。分割した各ブロックについてスコア表から求めた地位指数に補正値を乗じて、各ブロックの地位指数とした。

測定データと求めた地位指数から、成長曲線が Mitscherlich 式

$$H = A (1 - e^{-bt})$$

但し、 H : 樹高、 A : 要因量が無限大の時の

上限値、 b : 定数、 t : 要因量 (時間)

に従うと仮定して、各ブロックの 2000 年における H を推定した。

推定された H から、ブロック 1 の H に対するブロック 2、3 の H の割合を求め、その逆数をブロック 2、3 の測定データに掛け合わせることによって補正し、補正されたデータによって前項と同様に順位を付け、生長の良し悪しを推定した。

以上の処理は SPSS7.5J for Windows (7, 8) を用いて行った。

2. 結果と考察

(i) 賀茂県有林 A

各ブロックごとに決定された重回帰式の係数を表-2 に示す。これらの重相関係数は、 $R > 0.5$ であり、非常に良く当てはまった。

重回帰式によって修正した値について、欠測値を補正するための線形式を求めたところ、

$$Y_{ij} = 438.3 - 42.917i + 2.045j + 103.263$$

但し、 i : ブロック番号、 j : 組み合わせ番号となった。

この式によって、各組み合わせ、各ブロックについて欠測値を求め、それぞれの順位を求めた結果が表-3 である。補正によって、順位が大きくなり入れ替わった組み合わせがあった。このことは、

表-2 決定された重回帰式の係数

変数項	ブロック1	ブロック2	ブロック3	ブロック4	ブロック5	ブロック6
X_1	-31.929	8.322	-49.946	1.547	15.385	-23.643
X_1^2	5.894	1.514	-0.982	0.259	-2.325	0.412
X_1^4	-0.00551	-0.00381	-0.000256	0.007636	0.002809	-0.000228
X_1X_2	-0.865	-3.677	4.716	-1.349	-2.504	6.446
X_2	-46.995	23.81	35.979	-53.392	-16.96	15.234
X_2^2	4.032	-2.1	-2.496	5.368	4.93	-6.563
X_2^4	-0.0134	0.01009	-0.00953	-0.000002	-0.0349	0.0385
X_3^4	-0.0011	0.00038	0.0003258	-0.000764	0.001685	-0.00216
X_4^4	-0.00109	-0.000289	0.001773	-0.000422	0.00011	0.000415
(定数)	794.309	430.064	385.835	451.576	474.475	407.335
重相関係数	0.542	0.541	0.605	0.642	0.532	0.507

測定データが立地の影響を大きく受けていたことを示し、補正によって立地の影響が除去されたと考えられる。

表-3 賀茂県A試験地における順位

組み合わせ	修正前	修正後
南1号×天7号	1	38
北8号×北2号	2	41
北2号×東2号	3	40
岡1号×新5号	4	43
南1号×額2号	5	31
北8号×東11号	6	42
北2号×南2号	7	39
北4号×北8号	8	24
北2号×岡1号	9	22
南3号×東4号	10	30
北4号×東6号	11	18
岡1号×天18号	12	19
北4号×北2号	13	17
新5号×天18号	14	21
北2号×新5号	15	25
北4号×東11号	16	28
南3号×東8号	17	27
北3号×南3号	18	32
東4号×東8号	19	36
東8号×北1号	20	35
東10号×北3号	21	37
北3号×北1号	22	29
南3号×北1号	23	34
北3号×東4号	24	33
北6号×東8号	25	16
天18号×東7号	26	26
東4号×北1号	27	15
東4号×北6号	28	23
北7号×北3号	29	20
天18号×北5号	30	12
東7号×北3号	31	14
天18号×東10号	32	13
天18号×北7号	33	10
北7号×東10号	34	9
北3号×北6号	35	6
北6号×北1号	36	5
天18号×北3号	37	7
南3号×北6号	38	11
北5号×東7号	39	8
東7号×東10号	40	3
北5号×北3号	41	4
北5号×北7号	42	2
北5号×東10号	43	1

(ii) センター試験地

現地調査から、ブロック1の土壌型は B_b、ブロック2は圃行の B_{b(a)}、ブロック3は B_cであった(図-3)。

小林ら(3)の調査において、プロット14のスギは39年生で樹高18.5mであり、このプロットにスコア表を適用すると、地位指数(40年生時における樹高)は25.66となった。プロット14のスギの40年生時における樹高を19mと推定すると、スコア表の結果に0.74を乗じたものと一致した。そこで、補正値を0.74として、スコア表から各ブロックの地位指数を推定するとブロック1は17.95、ブロック2は14.60、ブロック3は11.44となった。

この推定地位指数と測定データから、Mitscherlich式を決定した結果が表-4である。決定された式は、測定データに非常に良く当てはまった。決定された式から各ブロックの8年生時(2000年時)の樹高を求め、ブロック1に対するブロック2、3の割合を求めると、ブロック2:0.8527、ブロック3:0.7648となった。すなわち、ブロック2、3の測定データにそれぞれ、1.1727、1.3075を乗じることによって、ブロック間の立地の影響を除去できるものと考えられた。

この方法で修正した樹高によって順位を付けた結果が表-5である。修正によって、順位が大きく入れ替わった組み合わせがあった。このことは、測定データが立地の影響を大きく受けていたことを示し、修正によって立地の影響が除去されたと考えられる。

表-4 決定されたMitscherlich式の係数

	A	b	決定係数
ブロック1	3000	0.02211	0.97722
ブロック2	2500	0.02166	0.97922
ブロック3	1605.3	0.03141	0.97612

表-5 センター試験地における順位

組み合わせ	修正前	修正後
南3号×北1号	1	6
南2号×天18号	2	7
岡1号×新5号	3	9
東2号×岡1号	4	10
南2号×新5号	5	11
新5号×天18号	6	14
東7号×北3号	7	1
北3号×南3号	8	2
天18号×北3号	9	3
北2号×新5号	10	20
北3号×東4号	11	21
北8号×北2号	12	23
南2号×岡1号	13	24
北5号×北3号	14	19
北8号×東11号	15	25
南3号×北6号	16	16
北2号×天18号	17	26
北2号×岡1号	18	27
北2号×東2号	19	28
南2号×東2号	20	30
東2号×新5号	21	31
天18号×東7号	22	32
北4号×北2号	23	33
天7号×東11号	24	34
北3号×北1号	25	4
南3号×東4号	26	12
天7号×北2号	27	36
東10号×北3号	28	5
東4号×北1号	29	8
北5号×東7号	30	15
北4号×北8号	31	38
北3号×北6号	32	18
北5号×東10号	33	39
東11号×北2号	34	40
北7号×北3号	35	29
南1号×天7号	36	41
北7号×東10号	37	42
岡1号×天18号	38	43
北5号×北7号	39	44
北6号×北1号	40	22
南1号×新1号	41	45
天18号×北5号	42	13
北2号×南2号	43	46
天18号×北7号	44	47
北4号×東6号	45	48
東4号×東8号	46	17
天7号×東6号	47	49
北4号×東11号	48	50
新1号×天7号	49	51
東7号×東10号	50	37
東2号×天18号	51	52
東4号×北6号	52	35
南1号×額2号	53	53

(iii) 修正結果の検討

賀茂県 A 試験地とセンター試験地に共通して植栽されている39組み合わせについて、修正前と修正後の順位付けの結果を表-6に示す。修正後の順位について、Kendall の一致係数を求め、検定を行ったところ(2)、危険率5%で順位に一貫性があった。このことから、今回行った修正法は、立地の影響を除去するのに有効であったことが確認された。

表-6 共通組み合わせの修正前後の順位

組み合わせ (♀×♂)	賀茂県A		センター	
	修正前	修正後	修正前	修正後
南1号×天7号	1	34	26	31
北8号×北2号	2	26	9	20
北2号×東2号	3	19	14	23
岡1号×新5号	4	14	2	8
南1号×額2号	5	28	39	39
北8号×東11号	6	35	11	21
北2号×南2号	7	21	32	35
北2号×岡1号	8	16	13	22
北4号×北8号	9	38	22	29
南3号×東4号	10	7	18	9
北4号×東6号	11	36	34	37
岡1号×天18号	12	18	28	33
北4号×北2号	13	37	16	26
新5号×天18号	14	22	3	11
北2号×新5号	15	15	7	17
北4号×東11号	16	39	36	38
北3号×南3号	17	11	5	2
東4号×東8号	18	3	35	14
東10号×北3号	19	12	19	5
北3号×北1号	20	8	17	4
南3号×北1号	21	5	1	6
北3号×東4号	22	10	8	18
天18号×東7号	23	24	15	25
東4号×北1号	24	2	20	7
東4号×北6号	25	4	38	27
北7号×北3号	26	13	25	24
天18号×北5号	27	25	31	10
東7号×北3号	28	20	4	1
天18号×北7号	29	29	33	36
北7号×東10号	30	17	27	32
北3号×北6号	31	9	23	15
北6号×北1号	32	1	30	19
天18号×北3号	33	33	6	3
南3号×北6号	34	6	12	13
北5号×東7号	35	32	21	12
東7号×東10号	36	23	37	28
北5号×北3号	37	27	10	16
北5号×北7号	38	31	29	34
北5号×東10号	39	30	24	30

修正後の順位について、各試験地の上位8組み合わせ、下位8組み合わせを抽出したところ、表-7のとおりとなった。このうち、上位では南設楽3号×北設楽1号、東加茂4号×北設楽1号、北設楽3号×北設楽1号が、下位では北設楽4号×東加茂6号、北設楽4号×東加茂11号が共通していた。この結果から、今回の試験で植栽した組み合わせのうち、南設楽3号×北設楽1号、東加茂4号×北設楽1号、北設楽3号×北設楽1号が生長に関して優良な組み合わせであると考えられる。また、父系に北設楽1号が入っているものが生長が良く、母系に北設楽4号が入っているものが生長が悪いように見受けられたが、これに関しては、遺伝分析を行い、その結果を検討する必要がある。

両親としたものであるが、その中でも生長の悪いものがあった。このことは、交配によって劣性遺伝子が集積されたことが原因であると考えられる。

どの試験地においても樹高と胸高直径の相関が高かったことから、樹高と胸高直径の割合（形状比：H/D）は組み合わせによらず、試験地の立地条件によるものと考えられる。スギ林においては、林齢で約10年、樹高で約6mの時に林分の閉鎖が完了し、その前後で直径の樹高に対する相対生長が等生長から劣生長に変化することが報告されている（6）。相対生長が等生長の時は形状比が一定となり、これは主として地位の良否による（4）。今回の調査は、林分が開放状態から閉鎖に向かう過程で行っており、これらのことから、形状比は立地の影響を強く受けていると推察される。また、賀茂県A試験地とセンター試験地に共通して植栽されている39組み合わせが線形判別関数でグループ分けが可能であるのは、同様の理由でそれぞれの試験地の立地条件の違いによるところが大きいと考えられる。

立地の影響の除去は、実際の立地環境を要因としない数学的な方法（賀茂県A試験地）と土壌調査の結果を基にした方法（センター試験地）を適用し、その結果を検討したところ、有効性が確認された。今回の調査では、立地の影響を軽減するために複数の試験地に植栽したが、実際には組み合わせの数は多いが個体数が少なく、反復区が設定できなかったため、結果としてより立地の影響を受けることとなった。今後このような検定を行う際には、目的とする形質をはっきりさせ、それが発現しやすいような交配計画を立てるとともに、現地植栽にあたっては、乱塊法の条件を満たすように計画することが必要である。また、得られたデータも、今回用いた修正法により精査することが重要である。

表-7 修正後の順位による生長の良い組み合わせ・悪い組み合わせ

	賀茂県A	センター
生長が良いもの	北6号×北1号	東7号×北3号
	東4号×北1号	北3号×南3号
	東4号×東8号	北3号×北1号
	東4号×北6号	天18号×北3号
	南3号×北1号	南3号×北1号
	南3号×北6号	東10号×北3号
	南3号×東4号	岡1号×新5号
	北3号×北1号	東4号×北1号
生長が悪いもの	北4号×東11号	南1号×額2号
	北4号×北8号	北4号×東11号
	北4号×北2号	北4号×東6号
	北4号×東6号	天18号×北7号
	北8号×東11号	北2号×南2号
	南1号×天7号	北5号×北7号
	天18号×北3号	岡1号×天18号
	北5号×東7号	北7号×東10号

※網掛けは両試験地で共通して良かった（悪かった）組み合わせ

V 総合考察

今回調査を行った交雑育種苗は、全て精英樹を

VI 引用文献

- (1) 明石孝輝 (1976) 重回帰式利用による試験地内のマクロな立地効果の除去. 林試研報280: 47-55.
- (2) 市原清志 (1990) バイオサイエンスの統計学. 378pp, 南江堂, 東京.
- (3) 小林元男, 山下昇 (1985) 試験林調査報告. 愛知林試報21: 41-121.
- (4) 箕輪光博 (1990) 林木生長論. (現代林学講義10測樹学, 243pp, 地球社, 東京). 147-234.
- (5) 森下信明, 竹内英男, 熊川忠芳 (1996) 交雑育種に関する研究. 愛知林セ報33: 21-32.
- (6) 南雲秀次郎, 佐藤健 (1965) Mitscherlich式による森林の生長予測. 東大演報61: 37-102.
- (7) SPSS Base 7.5J for Windows User's Guide (1997) 426pp, SPSS Inc., Tokyo.
- (8) SPSS Professional Statics 7.5J (1997) 39pp, SPSS Inc., Tokyo.
- (9) スギ林地位指数推定スコア表 (秩父、天竜、天城地域) (1987) (林業実務必携第3版. 東京農工大学農学部林学科編, 607pp, 朝倉書店, 東京). 108-109.
- (10) 植木忠二, 小林玲爾, 明石孝輝 (1991) 乱塊法による植栽試験地の反復区の再区分によるマクロな立地効果の除去. 日林誌73: 64-68.