

二つの地域に設定された産地試験地におけるケヤキの初期成長特性

河合慶恵・高橋誠 (森林総研林育セ) 玉城聡・久保田正裕 (森林総研関西林育セ)

要旨：茨城県と高知県に設定されたケヤキ産地試験地において成長形質を調査した。両試験地において初期成長に対する家系の効果は大きく、高い遺伝率が算出され、ケヤキの初期成長は遺伝的支配を強く受ける形質であると考えられた。両試験地に共通して植栽された家系を用い、産地を要因として10年次樹高に与える効果を検討した結果、産地効果は有意ではなく、産地と試験地の交互作用効果も検出されなかった。しかし試験地ごとに、産地間の10年次樹高を多重比較したところ、産地間で有意に異なる組み合わせが認められた。二試験地のデータのみの解析であるが、ケヤキの初期成長に対する産地効果は家系効果と比較して非常に小さいことが明らかになった。

キーワード：ケヤキ、産地試験地、初期成長、遺伝率

I はじめに

森林へのニーズの多様化に伴い、広葉樹造林への関心も高まっている。森林総合研究所林木育種センターでは、成長や形質の優れた優良広葉樹の開発を目指して、平成9年度から広葉樹優良形質木育種プロジェクトを推進してきた。このプロジェクトでは、用材生産用のケヤキ、ブナなどの広葉樹について、優良形質候補木の選抜、クローン増殖などを推進することとなっている。関東育種基本区内ではケヤキが対象樹種となっており、2010年10月末日現在で基本区内の1都12県より188個体が選抜され(6)、一部の個体を除き、つぎ木によりセンター内にクローン増殖保存されている。

選抜された優良形質候補木の今後の育種的な活用のために、ケヤキ着花量に影響する気象要因の解明(4)、人工交配(7)および採種園造成に関わる技術開発(8)が行われてきた。本研究ではケヤキの初期成長において、優良な家系や個体を効率的に選抜するため必要な遺伝率を推定した。また、植物は本来の生育適地である選抜地と異なる環境に植栽されると、適応性が変化する(10)。特に、異なる環境下で系統の成長順位が入れ替わる現象は、遺伝子型と環境の交互作用と呼ばれている(12)。こうした環境と遺伝子型との交互作用の大きさについて把握することが、造林実績の少ないケヤキについて、適切な種苗配布区域を設定するうえで不可欠である。そこで本研究では、茨城県と高知県に広域産地試験地を設定し、ケヤキの初期成長における植栽環境と産地の交互作用および産地の効果の大きさについて検討した。

II 試験地概要と解析方法

産地試験地は茨城県石岡市宇東深間国有林(茨城森林管理署管内、茨城とする)、高知県香美市(森林総合研究所林木育種センター関西育種場四国増殖保存園不寒冬山事業地内、高知とする)の二箇所に設定された(表-1)。

両試験地の気象条を比較すると、年降水量において高知試験地が茨城試験地の2倍以上であるが、年平均気温と最大積雪深において大きな差異はなかった(表-1)。

表-1. 各産地試験地の気象条件

試験地	年平均気温(°C)	年降水量(mm)	年最深積雪深(cm)	標高(m)
茨城	13.0	1263	6	148
高知	12.7	2995	2	495

両試験地は茨城県から宮崎県までの18府県で選抜されたケヤキ母樹から採種・育苗した自然交配家系苗を用いて設定された。種子採取にあたっては、関西地区林業試験研究機関連絡協議会育種部会、林木育種センター本所、九州育種場と共同で収集した。母樹の選抜地等は、すでに報告されている(5, 11)。茨城試験地で供試苗は1999年3月、単木混交法で11ブロックに植栽され、総植栽本数は61家系(うち対照4家系)965本であった(表-2)。植栽間隔は1.4m×2.0mであった。ブロックは

表-2. 試験地概況

試験地	設定年	設定本数	ブロック	家系数	10年次樹高(m)	10年次胸高直径(cm)	生存率
茨城	1999年	965	11	61	3.4±1.1	2.9±1.7	70%
高知	1998年	4590	4(8)	81	2.9±1.4	2.8±1.1	86%

()内の数字は再区分したブロック数を示す

小面積かつ不連続で、傾斜と斜面方向が異なる複数の斜面上に設定された。なお一部の個体は活着せず、2001年春に補植を実施した。2から8および10年次に毎木調査を行い、樹高や枯損状態等を記録した。また5年次以降は胸高直径も測定した。解析に供した個体は、10年次までの試験期間を通して誤伐等の人為被害を受けなかった個体のうち、各年次における生存個体とした。また2001年に測定したデータの解析にあたっては、補植した個体を除去して算出した。高知試験地で供試苗は1998年3月に、プロット当たり15本、4ブロックの乱塊法で植栽され、総植栽本数は81家系4590本である(表-2)。植栽間隔は1.5m×1.5mである。1, 3から7, および10年次に毎木調査を行い、樹高や枯損状態等を記録した。

Yoshie KAWAI, Hisao KAWASAKI, Makoto TAKAHASHI (For. Tree Breed. Cent., FFPRI, Ishi 3809 - 1, Jyuou, Hitachi, Ibaraki 319 - 1301), Satoshi TAMAKI, Masahiro KUBOTA (Kansai Regional Breeding Office., For. Tree Breed. Cent., FFPRI, Uetsukinaka 1043, Syouou, Katsuta, Okayama 709 - 4335) Initial growth trait of *Zelkova serrata* at provenance trial plantations in two regions.

また 10 年次は胸高直径も測定した。このうち 4, 6 および 10 年次の測定値を解析に用いた。各年次の解析には 10 年次に生存した個体の測定値のみ使用した。高知試験地は同一斜面上に試験地が設定され、同一ブロック内であっても斜面上部と下部の成長量は大きく異なる。既報 (2, 9) から、設定時に区分した 4 ブロックよりも樹高平均値の偏差をもとに再区分した 8 ブロックを用いる解析により系統間分散が多く検出された。本研究においても (9) による 8 ブロックを採用し解析に用いた。

各試験地において個体の測定値を用いて分散分析を行い、各要因に対する検定と分散成分の推定値を算出した。解析にあたっては、測定値が以下の線形モデルで表されると仮定した。

$$Y_{ijk} = \mu + r_i + m_j + rm_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

ここに、 Y_{ijk} は i 番目のブロックにおける j 番目の交配親を母樹とする系統の k 番目の個体の測定値である。 μ , r_i , m_j , rm_{ij} , ε_{ijk} は、それぞれ全平均、ブロックによる効果、 j 番目の交配親が母樹であるときの効果、ブロック×母樹の効果、誤差である。算出するにあたっては、Type 3 の平方和を使用した。ブロック×母樹の効果が有意でない場合は、検定誤差を算出し各要因の F 値を算出した。また狭義の遺伝率 (h^2) は以下の式を用いて推定した。

$$h^2 = 4 \times \sigma_m^2 / (\sigma_m^2 + \sigma_{rm}^2 + \sigma_\varepsilon^2)$$

ここで σ_m^2 , σ_{rm}^2 , σ_ε^2 はそれぞれ、上記のモデルで分散分析して推定される母樹、ブロック×母樹、誤差の各分散成分を表す。

また、ケヤキの 10 年次樹高に対する試験地と産地の交互作用効果を検証するため、両試験地に共通して植栽された 42 家系のうち、各試験地で 2 ブロック以上に植栽されている家系を選抜し、ブロックごとの系統平均値を解析に供した。本研究ではケヤキ母樹の選抜地をその属する地域によって大きく区分し、この地域区分を産地と定義した。産地の効果を検定するため、選抜地によって家系の産地を関東・近畿瀬戸内・日本海岸・九州と区分した。解析にあたっては、測定値が以下の線形モデルで表

$$Y_{ijlm} = \mu + s_l + r_l + p_m + m_{jm} + (s \times p)_{lm} + (r \times p)_{ilm} + \varepsilon_{ijlm}$$

されると仮定した。

ここに、 Y_{ijlm} は l 番目の試験地における i 番目のブロック

における m 番目の産地の j 番目の交配親を母樹とする系統のブロック平均値である。ここで、モデル内の s_l , r_l , p_m , m_{jm} , $(s \times p)_{lm}$, $(r \times p)_{ilm}$, ε_{ijlm} はそれぞれ、 l 番目の試験地の効果、 l 番目の試験地の i 番目のブロックによる効果、 m 番目の産地の効果、 m 番目の産地の j 番目の交配親が母樹であるときの効果、 l 番目の試験地と m 番目の産地の交互作用効果、 l 番目の試験地の i 番目のブロックと m 番目の産地の交互作用効果、誤差である。算出するにあたっては、Type 3 の平方和を使用した。

また、両試験地においてそれぞれ 10 年次樹高に対する各要因の効果を検定した。解析にあたっては、個体の測定値が以下の線形モデルで表されると仮定した。

$$Y_{ijmk} = \mu + r_i + p_m + m_{jm} + (r \times p)_{im} + (r \times m)_{ijm} + \varepsilon_{ijmk}$$

ここに、 Y_{ijmk} は i 番目のブロックにおける m 番目の産地の j 番目の交配親を母樹とする系統の k 番目の個体の測定値である。 $(r \times p)_{im}$, $(r \times m)_{ijm}$ はそれぞれ、 i 番目のブロックと m 番目の産地の交互作用効果、 i 番目のブロックと m 番目の産地の j 番目の家系の交互作用効果である。また、両試験地における産地ごとの 10 年次樹高の最小自乗推定値を算出した。算出するにあたって測定値が以下の線形モデルで表されると仮定した。

$$Y_{ijmk} = \mu + r_i + p_m + m_{jm} + (r \times p)_{im} + \varepsilon_{ijmk}$$

算出した最小自乗推定値について産地間差を検定するため、各産地の 10 年次樹高について Tukey 法による多重比較を用い、5% 水準で平均値の差の有意性を検定した。解析には農林水産省科学技術計算システムの SAS (Ver. 9.2) の GLM プロシジャを用いた。

III 結果と考察

茨城と高知の二地域に設定されたケヤキ産地試験地において、10 年次平均樹高はそれぞれ 3.4 m および 2.9 m となり、平均胸高直径はそれぞれ 2.9 cm および 2.8 cm となった (表-2)。同一ブロック内であっても植栽場所による成長の差は大きく、斜面の下方ほど成長が良い傾向にあった。

茨城および高知試験地において算出された樹高の家系間差は、全ての年次で高度に有意であった (表-3)。また、同様に胸高直径の家系間差は測定された全年次で有意であった (表-3)。各試験地において算出された樹高の遺伝率は、全ての年次で茨城試験地よりも高知試験地が高く、高知における遺伝率の範囲は 0.52 から 0.67、茨城では 0.29 から 0.60 であった (図-1)。胸高直径に

表-3. 茨城県と高知県の各試験地における家系間の樹高および胸高直径における有意差の有無

試験地	要因	樹高								胸高直径				
		1	2	3	4	5	6	7	8	10	5	6	7	8
茨城	解析個体数	602	613	597	604	581	587	580	545	581	566	577	571	545
	ブロック	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	家系	**	**	**	*	**	**	**	**	**	*	**	*	*
	ブロック×家系	*	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
高知	解析個体数	4133	4038	4397	4024	4263	4139		3929					3760
	ブロック	**	**	**	**	**	**	**	**					**
	家系	**	**	**	**	**	**	**	**					**
	ブロック×家系	**	**	**	**	**	**	**	**					**

**は1%, *は5%水準で有意な要因間差が認められたことを, nsは有意な差が認められないことを示す

高知試験地における1, 3, 5, 7年次の算出データは(9)による

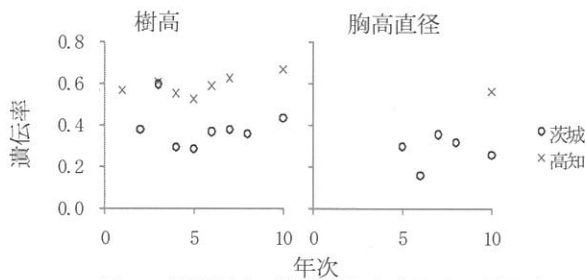


図-1. 各試験地で算出された各年次の遺伝率
高知試験地における1, 3, 5, 7年次の算出データは(9)による

ついて算出された遺伝率は樹高よりも小さく、遺伝率の範囲は茨城で0.16から0.36、高知では10年次で0.56となった(図-1)。遠藤ら(1998)はケヤキ自然交配家系の4年生苗を調査し、樹高と胸高直径の狭義遺伝率はそれぞれ0.3および0.4以上とした(1)。また森ら(2004)はケヤキ自然交配家系の6年生苗を調査し、幹長と胸高直径の狭義遺伝率をそれぞれ0.38および0.25とした(3)。対象とする育種集団の規模や植栽環境、含まれる遺伝変異の大きさなどにより遺伝率は変化する(12)。本研究では、茨城試験地における遺伝率は既存の結果と同等となり、高知試験地では、既報より高い遺伝率が推定された。これらの結果から、ケヤキの初期成長は遺伝的支配を強く受ける形質であることが確かめられた。両試験地は、優良個体の選抜母集団としても位置づけられており、上記の結果は、各試験地から優良個体を効率的に選抜するうえでも重要であると考えられた。

両試験地に共通して植栽されている4産地42家系を用いて試験地と産地の交互作用効果について解析した。10年次樹高について、試験地と産地に有意な交互作用は認められなかった(表-4)。また産地の効果も認められなかった。ブロックと家系の効果は高度に有意であり、産地の効果はブロックや家系の効果と比較して小さいと

表-4. 両試験地に共通して植栽された家系を用いた10年次樹高の分散分析結果

要因	自由度	平均平方	分散比	P
試験地	1	304777	3.78	ns
ブロック(試験地)	17	80616	8.36	<0.01
産地	3	33730	1.77	ns
家系(産地)	38	9304	1.69	<0.01
試験地×産地	3	19068	1.98	ns
ブロック(試験地)×産地	51	9645	1.75	<0.01

考えられた。また、試験地の効果は認められなかった。これは、試験地間の気象条件の差が小さかったことに起因すると考えられた。

さらに、各試験地において10年次樹高について影響を与える要因について検定した結果、茨城試験地において産地に有意な効果が認められた(表-5)。高知試験地において産地の効果は有意ではなかった。また、両試験地において産地内家系の効果は有意であった。

表-5. 各試験地における10年次樹高の分散分析結果

試験地	要因	自由度	平均平方	分散比	P
茨城	ブロック	10	80616	3.09	<0.01
	産地	3	33730	3.49	<0.05
	家系(産地)	38	9304	1.61	<0.05
	ブロック×産地	30	19068	1.94	<0.01
	ブロック×家系(産地)	172	9645	1.10	ns
高知	ブロック	7	1946671	63.29	<0.01
	産地	3	183141	2.47	ns
	家系(産地)	38	74190	1.84	<0.01
	ブロック×産地	21	30756	0.76	ns
	ブロック×家系(産地)	90	40260	8.02	<0.01

各試験地において算出された、産地ごとの10年次樹高の最小自乗推定値について四産地間で比較し順位付けしたところ、両試験地において九州を産地とする家系が最も大きく、下位の二産地と有意に異なった(図-2)。茨城試験地で二番目に樹高が大きかった関東産の家系は、高知試験地では最下位となり、10年次樹高の最小自乗推定値は他産地と比較して有意に低い値となった。同様に茨城試験地で最下位であった近畿瀬戸内産の家系は、高知試験地では二番目に樹高が大きかった。

本研究の結果では、産地が10年次樹高に与える効果は

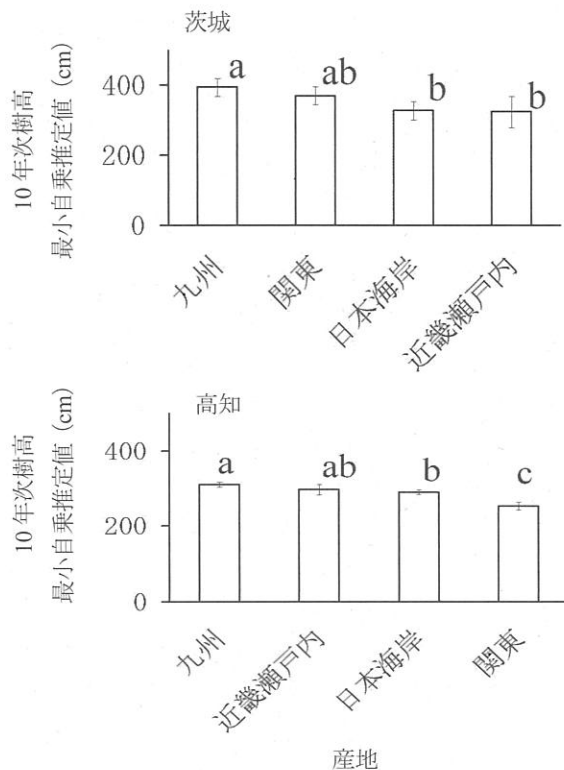


図-2. 両試験地における産地別 10 年次樹高
 図中の英字は多重比較によるグループを示す($P < 0.05$)

両試験地を用いた解析から検出されなかった。しかし試験地ごとに 10 年次樹高に対する産地の効果を検定した結果、茨城試験地では有意な効果が認められた。また、10 年次樹高の最小自乗推定値を用いて産地間の樹高を多重比較し順位付けを行い、両試験地において九州を産地とする家系の樹高は下位の産地と比較して有意に大きいことが確かめられた ($P < 0.05$)。また、試験地間で産地の順位変動が認められたが、これは試験地と産地の交互作用を示唆するものであると考えられた。これらの結果から本研究で用いた二地域に設定された産地試験地では、家系効果と比較して非常に小さいが、ケヤキの初期成長に対する産地の効果は存在すると考えられた。

IV まとめ

本研究はケヤキについて初めて、広域に設定された複数の産地試験地を用い、成長形質の遺伝性と植栽地域と産地の交互作用について明らかにした。ケヤキの初期成長形質は遺伝的支配を強く受ける形質であると考えられた。また産地を要因として 10 年次樹高に与える効果を検討した結果、ケヤキの成長に対する産地効果は産地内家系効果と比較して非常に小さいことが明らかになった。

茨城試験地では、10 年次までほぼ毎年下刈りを行った

が未だ林冠が閉鎖していない。誤伐や虫害も頻発しており、スギやヒノキと比べ造林実績の少ないケヤキを造林樹種として使用するためには、育種による遺伝的改良とともに安定した造林技術の開発が必要不可欠であると考ええる。

引用文献

- (1) 遠藤良太・小平哲夫・明石考輝 (1998) 千葉県におけるケヤキ優良家系の諸形質—4 年生次の狭義の遺伝率—。千葉林試報 9 : 1-4.
- (2) 久保田正裕・那須仁弥・門脇幸司・古本良 (2001) ケヤキ産地試験地における成長形質の調査—3 成長期後の結果—。林木育種センター関西育種場年報 36 : 80-83.
- (3) 森康浩・宮原文彦・大長光純・平岡裕一郎 (2004) 有用広葉樹としてのケヤキの育種—優良ケヤキ次世代の初期成長とクワカミキリ被害—。九州森林研究 57 : 207-209.
- (4) 宗原慶恵・高橋誠・平岡裕一郎・三浦真弘・谷口真吾・渡邊敦史 (2008) 茨城県・福島県南部におけるケヤキ着花量の年変動と気象要因との関係。関東森林研究 59 : 129-132.
- (5) 西村慶二・山田浩雄・門脇幸司・林田修 (1999) ケヤキ産地試験地の調査結果。林木育種センター関西育種場年報 34 : 92-96.
- (6) 森林総合研究所林木育種センター (2009) 林木育種の実施状況及び統計. 85pp, (独) 森林総合研究所林木育種センター, 茨城.
- (7) 高橋誠・加藤一隆・武津英太郎・福田陽子 (2004) パクロプロラゾールとウニコナゾールを用いたケヤキの着花促進の検討。H16 林育セ年報 : 61-64.
- (8) 高橋誠・宗原慶恵・福田陽子・武津英太郎 (2007) ケヤキ断幹個体の萌芽反応—採種林造成時の断幹による樹型誘導の可能性の検討—。関東森林研究 58 : 87-90.
- (9) 玉城聡・織部雄一郎・山田浩雄 (2006) ケヤキ産地別試験地における初期成長の系統間および産地間変異。林木の育種特別号 (平成 17 年度第 35 回林木育種研究発表会講演集) 2006 : 1-3.
- (10) 渡辺録郎 (1961) 四国におけるスギ人工造林地の系統と成長の傾向。林木の育種 17 : 2-3.
- (11) 山田浩雄・西村慶二・植月充孝 (1998) ケヤキ、クヌギにおける産地・系統試験地の設定概要。林木育種センター関西育種場年報 33. 72-76.
- (12) ZOBEL, B. and TALBERT, J.(1984) Applied forest tree improvement. 505pp, John Wiley and Sons, New York.