

## 北海道育種基本区におけるトドマツ精英樹家系の成長と生存率

森林総合研究所 林木育種センター北海道育種場 田村明・生方正俊・那須仁弥・福田陽子・西岡直樹・佐藤新一

東北育種場 佐藤亜樹彦・九州育種場 阿部正信

## はじめに

北海道の気候は非常に多様であり、主要な造林樹種であるトドマツ (*Abies sachalinensis*) の被害要因も地域によって異なる。また、産地によって適応性に遺伝的差異があり、適応範囲にも著しい違いがあることが知られている (1,3,5)。北海道では、育種種苗の適応性を確保するため、3つの育種区に区分してトドマツ育種種苗を生産・配布している。この育種区は、気候、土壌、植生などの環境条件、行政区域等を考慮して決定されている。しかし、育種区の線引きは、地域差検定木の成長や生存率等を参考に実証的に確定していくことが重要であるとされている (4)。望ましい地域区分は、地域内の家系間で成長順位変動が小さい、つまり地域内で遺伝子型と環境の交互作用 (以後 GEI と略記する) が小さい区分である (6)。また、林木は永年性の植物であることから、一時点だけでなく、成長期間を通じて GEI を小さくするような地域区分が望ましい。

産地内でも植物生態や降水量、土壌条件などの環境条件は異なる。そのため、同一産地でも母樹間で適応性が異なる可能性がある。遺伝獲得量を高めるためには、適応性に関する気象環境因子を家系毎に明らかにし、森林毎に最適な家系を選択し、造林する方法も考えられる。あるいは、様々な環境下で優れた成績を示す、いわゆる広域適応性を示す家系を造林する方法もある。特に後者は今後の気候変動下でも適応できる可能性が高い重要な家系である。

本研究では、北海道 19 箇所に設定された地域差検定木の成長量および生存率の解析結果を基に、現在の育種区が種苗配布区域として妥当かどうかを検証した。また、各家系の成長量と生存率に影響する気象環境因子を推定したので報告する。

## 材料と方法

調査した地域差検定木の所在地および気象環境等の概要を表-1 に示した。地域差検定木は 5 ブロックの乱塊法で設計されている。1 プロット当り 30 本植栽しているため、検定木 1 箇所に 1 家系当り 150 本が植栽されている。供試材料は、北海道全域から選抜された精英樹 80 家系である。これらの実生家系は、採種園から採種し養苗されたものである。調査したのは 5 ブロック中 3 ブロックの全個体である。解析に利用したデータは 5 年次の樹高、

生存率および 20 年次の樹高、胸高直径、生存率である。

## 1) 現在の育種区の妥当性の検討

次の一般線形混合モデルで各変量効果の分散成分の制限付き最尤推定値を推定した。分散成分の算出には、農林水産研究センターの SAS 9.1 を利用した。解析データには、プロット平均値を用いた。ただし、生存率のプロット平均値は、プロット内の植栽本数に対する生存本数の割合を逆正弦変換した値とした。

$$y_{ijk} = \mu + s_i + f_j + sf_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

ここで、 $y_{ijk}$  は検定木  $i$  における家系  $j$  のブロック  $k$  におけるプロット平均値、 $s_i$  は検定木  $i$  の固定効果、 $f_j$  は家系  $j$  の変量効果、 $sf_{ij}$  は検定木  $i$  における家系  $j$  の変量効果、 $\varepsilon_{ijk}$  は測定値  $y_{ijk}$  のランダム誤差である。

現在、トドマツの育種種苗は、選抜地の属する育種区内に設定された採種園から生産された種苗を、その育種区内に配布・造林している。各育種区の各分散成分は、実状に合わせて、当該育種区選抜の家系のみを使って算出した。例えば、中部育種区の各分散成分の算出には、中部育種区から選抜された精英樹 13 家系のデータのみを使って推定している。そして、現行育種区の妥当性を評価するために、GEI の影響度を計算した。具体的には、家系分散 ( $\sigma_f^2$ ) に対する GEI 分散 ( $\sigma_{sf}^2$ ) の比 (以後 R 値と略記する) を計算した (6)。また、以下の式で表現型分散 ( $\sigma_p^2$ ) を算出し、表現型分散に占める各分散成分の割合を算出した。

$$\sigma_p^2 = \sigma_f^2 + \sigma_{sf}^2 + \sigma_e^2$$

ここで、 $\sigma_e^2$  は誤差分散を表す。

## 2) 各家系の生存率に関する因子の検討

メッシュ気候値 2000 年 ((財) 気象業務支援センター作成 CD-ROM) から、検定木の所在地が該当する 3 次メッシュの生育期間 (5 月～9 月) の平均気温 (°C)、積算降水量 (mm) および平均日照時間 (0.1h)、冬季 (11 月～3 月) の平均気温 (°C)、積算降水量 (mm) と 12 月～3 月の平均日照時間 (0.1h)、平均積雪深 (cm) および最深積雪深 (cm)、根雪期間 (日) を抽出した (表-1)。根雪期間は独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター寒地温暖化研究チームの井上聡氏から提供頂いた。各検定木の各家系の生存率の最小二乗推定値 (以後、LSM と略記する) を算出し、重回帰分析で、各家系の各年次の各形質に関する気象環境因子をステップワイズ法で選択した。なお、LSM の算出およ

Akira TAMURA, Masatoshi UBUKATA, Jinya NASU, Yoko FUKUDA, Naoki NISHIOKA, Sinichi SATO (Forest Tree Breeding Center Hokkaido Regional Breeding Office, Forestry and Forest Products Research Institute, 561-1 Bunkyoudai-midorimachi, Ebetsu, Hokkaido 069-0815), Akihiko SATO (FTBC Tohoku Regional Breeding Office, FFPRI, 95 Takizawa aza osaki, Takizawa, Iwate 020-0173), Masanobu ABE (FTBC Kyushu Regional Breeding Office, FFPRI, 2320-5 Suya, Goushishi, Kumamoto 861-1102) Growth and survival rate of plus tree seedlings of *Abies sachalinensis* in Hokkaido breeding region.

び重回帰分析は、農林水産研究センターの SAS 9.1 を利用した。

### 結果と考察

#### 1) 現在の育種区の妥当性の検討

表-2 に、5 年次と 20 年次の各育種区における各分散成分の推定値と R 値を示した。一般に R 値が 0.5 を超える場合、その地域で選抜や検定を行うことは危険であると言われている (6)。5 年次の樹高と生存率の R 値は、全育種区で 0.5 以上の値を示した。特に成林する上で最も重要な生存率の R 値が高かった。同じ育種区の中でも生存率の家系間の順位が場所によって大きく変化する可能性があることを示している。

20 年次では、中部育種区の全形質で R 値が 0.5 未満であった。それ以外の育種区では 0.5 以上の高い値を示し、表現型分散 ( $\sigma^2_p$ ) に占める家系間分散 ( $\sigma^2_f$ ) の割合が 5% 以下であったことから、同じ育種区でも場所によって家系間の順位が変動し、優良家系を植栽しても期待した改良効果が実現できない場合があることが示唆された。

5 年次および 20 年次の解析結果から、特に東部育種区で大きな R 値が算出された。また、形質の中では生存率で大きな R 値が算出された。成林の安全性を確保する上で最も重要な形質で、これだけ大きな R 値が算出されたのは問題である。さらに、R 値は樹齢によって変動する傾向もみられた。いずれにしても、現在の育種区による種苗配布区域では GEI の影響が大きく、これに代わる新たな地域区分が必要であると考えられる。なお、筆者らは、7 箇所の地域差検定林の材の密度を調査している。その結果では、材の密度の GEI は小さく、R 値は 0.5 未満だった。成長量や生存率と異なり、材の密度の家系間の順位は、育種区だけでなく、北海道一円であまり変動しない (7)。

#### 2) 各家系の成長量と生存率に関する気象環境因子の検討

表-3 に、気象環境因子ごとに統計的に有意だった家系数数とその割合を表した。

5 年次の樹高で、影響度の大きかった因子は、冬季の日照時間 (統計的に有意な家系数数が 16 家系) および根雪期間 (同 13 家系) であった。冬季の日照時間が長く、根雪期間が短い場所で樹高成長の優れた家系が多く見られた。特に十勝地方から北見地方で選抜された家系は、これらの選抜地の環境条件と同じように、冬季の日照時間が長い地域で樹高成長が優れる傾向にあった。一方、西南部育種区から選抜された家系は、根雪期間の長い地域で樹高成長が劣る家系の割合が多かった。

5 年次の生存率で、影響度の大きかった因子は冬季の降水量 (同 18 家系)、根雪期間 (同 16 家系) および冬季の気温 (同 10 家系) であり、冬季の環境条件が生存率に大きく影響する傾向があった。大略を述べると、冬季の気温が低く、冬季の降水量が多く、根雪期間が短い地域で生存率の優れた家系が多くみられた。特に中部と西南部育種区から選抜された家系でこの傾向が強い。

20 年次の樹高で、影響度の大きかった因子は、生育期間の降水量 (同 31 家系) および冬季の気温 (同 21 家系) であった。概略を言えば、生育期間の降水量が少なく、

冬季の気温が低い場所で樹高成長の大きくなる家系が多かった。この結果は 5 年次の結果と異なる。地域別には中部と西南部育種区から選抜された家系は、生育期間の降水量が少ない場所ほど、樹高成長の優れた家系が半数以上ある。一方、東部育種区から選抜された家系は、冬季の気温が低い場所ほど優れた家系が多かった。

20 年次の直径で、影響度の大きかった因子は、生育期間の降水量 (同 9 家系)、冬季の降水量 (同 9 家系) および最深積雪深 (同 9 家系) であった。すなわち、生育期間の降水量が少なく、冬季の降水量が多く、最深積雪深が大きい場所ほど肥大成長量の大きな家系が多くみられた。

20 年次の生存率で、影響度の大きかった因子は、冬季の日照時間 (同 41 家系)、根雪期間 (同 26 家系) および冬季の平均気温 (同 16 家系) であった。冬季の日照時間が長く、根雪期間が短く、冬季の平均気温が低い場所で生存率が高い家系が多く見られた。地域別には、中部および西南部育種区から選抜された家系は冬季の気温が低く、根雪期間が短い場所で生存率が高い傾向がみられた。また東部育種区から選抜された大多数の家系が、冬季の日照時間の長い場所で生存率が高かった。冬季の日照時間の長い場所は、根室・釧路・十勝地域に多く、これらの分布地域は、積雪深 15cm 発生日までの積算寒度が大きい地域と酷似していた (2)。なお、積算寒度とは、日平均気温が 0°C 以下の日の気温の絶対値を積算した寒さの指標である。積算寒度と土壤凍結深との間には顕著な相関があり、土壤凍結深が深い場所ではしばしばトドマツの寒乾害が生じる。土壤凍結深が深い東部育種区から選抜された家系群は、自生地の自然淘汰によって遺伝的に寒乾害に対して抵抗性を有する可能性があり、実際に寒乾害と考えられる被害が観察された標茶町と釧路町の検定林では、東部育種区産の精英樹家系の生存率が、他の育種区に比べて高い傾向にあった。

5 年次と 20 年次の結果を比較してみると、樹高では、20 年次で生育期間中の降水量が多い場所で成長低下を示す家系が増加した。一方、生存率では 20 年次で、冬季の気温が高く、根雪期間が長い場所で生存率が低下する家系が増加する傾向にあった。さらに、東部育種区から選抜された家系は、20 年次に冬季の日照時間の短い場所で生存率が低下する家系が急増していた。冬季の日照時間が短い地域は、日本海側に多く、積雪量や根雪期間が長い。このような地域では、雪害や暗色雪腐病等が発生しやすく、東部育種区から選抜された家系の多くは、これらの諸被害に対して感受性が高い可能性がある。20 年次に、これらの諸被害による生存率の低下が顕著に現れてきたものと推察された。このように、加齢に伴って影響する因子が異なる可能性が示された。

北海道内の自生地における環境条件の相違がトドマツの産地間や林分間の遺伝的変異を起こさせていると言われている (1,3,5)。実際に、産地 (育種区) 間で影響する気象環境因子が異なる傾向があった。また、本研究で、佐呂間町の同じ林小班の天然林から選抜された 4 家系に影響する因子を検証したところ、4 家系ともに影響する因子が異なった。この天然林分では、ある方向への強い自然淘汰が起きていなかったと予想されるが、同一産地

でも影響する因子が母樹間で異なる場合があることが伺われた。この様な同一産地内の母樹間での違いは、栄花らの耐凍性試験の結果でも報告されている (1)。

トドマツの育種種苗の改良効果を高めるためには、現在の育種区に代わる新たな種苗の配布区域を定めることが必要であると考えられる。また、今回の解析結果のように、各家系の成長や生存率に影響する因子がある程度特定できるならば、森林毎に最適な家系あるいは家系群を選択し、これを植林していく事も有効な方法であると考えられる。さらに、今回の解析で、全調査年次および全形質で影響因子が抽出されなかった家系が1家系存在した。この家系は広域適応性があり、北海道全土で優れた成長と生存率を示す特長を有していた。将来の地球温暖化による環境の変化にも適応できる家系として期待できるかもしれない。

### 今後の課題

現行のトドマツの種苗配布適地が、今後の気候変動下で不適地になる危険性がある。特にトドマツは、その伐期が50年以上と長いため、将来の気候変動を考慮した適切な種苗の配布および配布区域を設置する必要もあると考えられる。

### 謝辞

調査を行うにあたり、19箇所の地域差検定林を管轄する森林管理署および北海道森林管理局指導普及課の皆様には、調査のご理解と多大なるご協力いただいた。皆様には、深く感謝申し上げます。また、根雪期間のデータを

提供して頂いた独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター寒地温暖化研究チームの井上聡氏に感謝申し上げます。

### 引用文献

- (1) 栄花茂 (1984) 北海道におけるトドマツの耐凍性に関する生態遺伝学的研究. 林育研報 2 : 61-107
- (2) 福田正己・武田一夫 (1976) 北海道における昭和 49 ~ 50 年冬期の積算寒度値の分布. 低温科学資料集 33 : 85-91
- (3) 島山末吉 (1981) トドマツの産地間変異の地域性に関する遺伝育種学的研究. 北海道林試報 19 : 1-91
- (4) 三浦真弘ら (2005) 20 年生までのスギ地域差検定林データに基づく関東育種基本区の育種区再区分の検討. 日林誌 87 (3) : 233-240
- (5) 岡田滋 (1983) 北海道におけるトドマツ (*Abies sachalinensis* Mast.) の変異について. 林育研報 1 : 15-92
- (6) Shelbourne, C.J.A ( 1972 ) Genotype-environment interaction: its study and its implications in forest tree improvement , IUFRO Genetics-SABRAO Joint symposia B-1, TOKYO : 1-28
- (7) 田村明ら (2010) トドマツのピロディン貫入法による容積密度の育種価の推定. 第 60 回日本木材学会大会研究発表要旨集. CD-ROM

表-1. 各検定林の概要

検定林名	育種区	所在地	標高(m)	気温(0.1℃)			降水量(mm)		積雪深(cm)		日照時間(0.1時間)		根雪期間(日)
				5-9月平均	12-3月平均		5-9月積算	12-3月積算	12-3月最深	12-3月平均	5-9月平均	12-3月平均	
北見2号	道東部	美幌町	270	146	-79	614	263	105	80	1566	1106	160	
北見3号	道東部	佐呂間町	690	155	-83	559	219	76	61	1802	1178	126	
北帯6号	道東部	釧路町	70	141	-43	650	220	40	31	1460	1810	95	
北帯7号	道東部	本別町	650	139	-79	780	209	86	65	1631	1603	133	
北帯8号	道東部	標茶町	420	131	-78	765	264	102	70	1455	1180	123	
北帯11号	道東部	大樹町	280	149	-65	812	330	120	89	1571	1764	123	
		平均値	<b>397</b>	<b>144</b>	<b>-71</b>	<b>697</b>	<b>251</b>	<b>88</b>	<b>66</b>	<b>1581</b>	<b>1440</b>	<b>127</b>	
北函5号	西南部	知内町	300	158	-15	874	446	103	88	1685	693	109	
北函6号	西南部	厚沢部町	520	153	-46	840	436	112	88	1514	852	142	
北函7号	西南部	八雲町	420	153	-33	873	533	132	97	1634	793	123	
北函8号	西南部	大滝村	600	142	-67	707	373	154	117	1718	877	154	
北北15号	西南部	赤平市	216	166	-55	596	329	108	91	1838	952	137	
北北16号	西南部	平取町	400	152	-63	818	243	86	66	1721	971	166	
北北17号	西南部	新冠町	350	147	-63	877	260	106	80	1651	1177	171	
北北18号	西南部	夕張市	480	146	-72	762	397	171	143	1712	854	178	
北北19号	西南部	苫小牧市	240	144	-41	928	373	76	52	1437	1319	123	
		平均値	<b>392</b>	<b>151</b>	<b>-51</b>	<b>808</b>	<b>377</b>	<b>116</b>	<b>91</b>	<b>1657</b>	<b>943</b>	<b>145</b>	
北旭5号	中部	歌登町	270	144	-76	717	402	186	151	1730	850	150	
北旭7号	中部	猿払村	100	140	-73	621	425	136	112	1714	901	146	
北旭8号	中部	羽幌町	110	160	-49	664	504	119	100	1855	806	131	
北旭9号	中部	名寄市	350	143	-82	661	333	134	109	1798	934	170	
		平均値	<b>208</b>	<b>147</b>	<b>-70</b>	<b>666</b>	<b>416</b>	<b>144</b>	<b>118</b>	<b>1774</b>	<b>873</b>	<b>149</b>	

表-2. 各年次の各育種区の各形質における各分散成分とR値

調査年次	形質	育種区	各分散成分						R値 ( $\sigma_{st}^2 / \sigma_p^2$ )
			家系分散( $\sigma_p^2$ )		GEI分散( $\sigma_{st}^2$ )		誤差分散( $\sigma_e^2$ )		
5年	樹高	中部	0.001	(5)	0.000	(3)	0.017	(93)	<b>0.6</b>
		西南部	0.002	(9)	0.004	(15)	0.020	(76)	<b>1.6</b>
		東部	0.001	(5)	0.005	(21)	0.019	(74)	<b>3.9</b>
	生存率	中部	0.000	(0)	4.107	(5)	83.561	(95)	—
		西南部	8.372	(8)	12.853	(13)	77.665	(79)	<b>1.5</b>
		東部	1.718	(2)	13.235	(12)	98.132	(87)	<b>7.7</b>
20年	樹高	中部	0.098	(12)	0.000	(0)	0.688	(88)	<b>0.0</b>
		西南部	0.081	(5)	0.125	(8)	1.299	(86)	<b>1.5</b>
		東部	0.042	(3)	0.113	(8)	1.265	(89)	<b>2.7</b>
	直径	中部	0.387	(14)	0.000	(0)	2.349	(86)	<b>0.0</b>
		西南部	0.164	(4)	0.204	(5)	3.947	(91)	<b>1.2</b>
		東部	0.036	(1)	0.383	(13)	2.530	(86)	<b>10.8</b>
	生存率	中部	16.089	(13)	0.000	(0)	106.940	(87)	<b>0.0</b>
		西南部	7.017	(5)	14.812	(11)	118.870	(84)	<b>2.1</b>
		東部	0.000	(0)	13.386	(12)	100.150	(88)	—

注) —は、家系分散が0.0だったため、計算できなかったことを表す。

( )内の数値は表現型分散( $\sigma_p^2 + \sigma_{st}^2 + \sigma_e^2$ )に占める各分散成分の割合を表す (%)

表-3. 各年次の各形質に影響する因子

調査年次	形質	育種区	供試家系数	気温				積算降水量				最深積雪深		平均積雪深		日照時間				根雪期間	
				5-9月		11-3月		5-9月		11-3月		12-3月		12-3月		5-9月		12-3月		+ 注)	- 注)
				+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-		
5年	樹高	中部	13	1													1		1		
		東部	43	1	1							1			3	14			5		
		西南部	24		2											1				7	
		全体	80	2	3							1			3	16			13		
	生存率	中部	13		3	1	4													3	
		東部	43	1	1	2	5	7				1			1					6	
		西南部	24		6	3	9	1			1					1				7	
		全体	80	1	10	6	18	8			1	1			1	1				16	
		全体	80	1	10	6	18	8			1	1			1	1				16	
20年	樹高	中部	13	1	2	8					3						2			1	
		東部	43	3	1	17	11	2	5			1				6				6	
		西南部	24	3	2	12						1				1				1	
		全体	80	7	1	21	31	2	9			1				9				8	
	直径	中部	13	1		4	1	4			1					2	1				
		東部	43		2	5	3	2			2				3						
		西南部	24				5	3	2		2					2					
		全体	80	1	2	9	9	9			4				7	1					
		全体	80	1	2	9	9	9			4				7	1					
	生存率	中部	13		6	1	1				2				1					7	
		東部	43	3	3	1					2				2	34				6	
		西南部	24		7	3	1	2			1				6					13	
全体		80	3	16	1	4	1	1	2	5				2	41				26		
全体		80	3	16	1	4	1	1	2	5				2	41				26		

注) 表中の+ (-)は、左記の形質に、上記の因子が正 (負)の方向に寄与することを意味する。

表中の数値は、統計的に有意だった家系数を表し、( )内の数値は、育種区内の全供試家系数に占める割合を百分率で表した値を示す。