

論文

東京大学北海道演習林の異なる 4 標高に植栽されてから 45 年以上が経過した 11 樹種の生存と成長

後藤晋*・尾張敏章**・遠國正樹**・松井理生***

Survival and growth of eleven tree species after the elapse of more than 45 years since planting at four different altitudinal zones in the University of Tokyo Hokkaido Forest

Susumu GOTO*, Toshiaki OWARI**, Masaki TOKUNI*** and Masaki MATSUI***

はじめに

日本のような山岳地域では、標高が上がるにつれて大気や気温が低下し、日射と紫外線量は増加する(増沢, 2009)。また、強風や冬期間の低温などにより、高標高地は樹木の生育にきわめて厳しい環境となる(小池, 2002)。もともと本州よりも気候が厳しく、樹木の生育期間の短い北海道では、高標高地に造林できる樹種は極めて限定されると考えられる。これまで、高標高地に候補樹種を造林した現地適応試験がいくつか行われてきたが、その成否を明らかにした報告は乏しく(岩本ら, 1973; 柴田・岩本, 1973; 安達ら, 1985)、北海道の高標高地に造林可能な樹種を特定するには至っていない。

北海道中央部の富良野市に位置する東京大学大学院農学生命科学研究科附属北海道演習林(以下、北海道演習林)では、奥地林や高標高地の造林に適する樹種を探索するため、北海道演習林の大麓山南西斜面の4標高に寒冷地適応試験地(No.3020 ~ 3023)を設定し(農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林, 2007)、1959 ~ 61年に北海道における当時の主要造林樹種を植栽している。これまで、設定から5年、10年、20年後における主要11種の生存と成長についての既存報告がある(岩本ら, 1973; 安達ら, 1985)。しかし、その後の生存や成長経過についての報告はなく、寒冷地適応試験の長期の結果は得られていない。

そこで本研究では、これら11種を対象に、設定から45 ~ 47年後にあたる2008年に毎木調査を実施し、過去のデータと比較しながら、試験当初の目的である寒冷地造林に適する樹種の特定を試みた。また、各樹種における標高と生存率、胸高直径、樹高の関係を調べた。そして、これまでに北海道演習林で造林されてきた樹種と標高を調べた上で、高標高造林に適した樹種とその使い方について検討した。

* 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林教育研究センター
Education and Research Center, The University of Tokyo Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

** 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林
The University of Tokyo Hokkaido Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*** 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所
Ecohydrology Research Institute, The University of Tokyo Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

. 調査地と方法

北海道演習林における森林の垂直分布

北海道演習林（北緯 43°10′ -20′，東経 142°18′ -40′）内の標高の最高地は北東部に位置する大麓山 1,459m である。最低地は布部 190m であるため，その標高差は 1,269m，平均標高は 551m である。森林は標高に伴い垂直分布が認められ，低地から高地に向かって，標高 300m までの河岸，沢沿い，平坦地にはヤチダモ (*Fraxinus mandshurica* var. *japonica*)，ハルニレ (*Ulmus davidiana* var. *japonica*)，ケヤマハンノキ (*Alnus hirsuta*)，ヤナギ等を主とした広葉樹林，標高 300 ~ 600m の山腹斜面にはトドマツ，広葉樹の混交林もしくはトドマツ (*Abies sachalinensis*)，エゾマツ (*Picea jezoensis*)，広葉樹の混交林が見られ，標高 600 ~ 800m にはエゾマツ，トドマツ，ダケカンバ (*Betula ermanii*) 混交林が現れ，さらに上部になるとエゾマツ，アカエゾマツ (*Picea glehnii*)，ダケカンバの疎林，ハイマツ (*Pinus pumila*) その他の高山植物帯となる。林床の大部分はササ類が密生しており，植生は標高 700m 付近を境に上部にチシマザサ (*Sasa kurilensis*)，下部にクマイザサ (*Sasa senanensis*) が繁茂している（加藤，1952；農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林，2007）。

試験地の概要と環境

本試験地は，北海道演習林の最高峰である大麓山（山頂標高 1,459m）の南西斜面 4 箇所（Ⅰ区；530m，Ⅱ区；730m，Ⅲ区；930m，Ⅳ区；1,100m）が 1959 年に設定されている。なお，GPS 受信機（GPSMAP60CSx，Garmin 社）により各区の標高を再測した結果，Ⅰ区が 547m，Ⅱ区が 728m，Ⅲ区が 933m，Ⅳ区が 1,135m であったため，本論文のデータ解析ではこの標高値を用いた。

岩本ら（1973）と北海道演習林（1977）のデータからまとめた各区の気象条件は表 - 1 の通りである。標高の上昇に伴い，試験区の年平均気温は 1.8 ~ 5.3（岩本ら，1973），最大積雪深は 140 ~ 280cm（北海道演習林 1977）と大きく変化する。一方，湿度はⅢ区が 83.3%とやや高いが，その他は 75 ~ 79%であり，標高との明瞭な関係は認められない（北海道演習林，1977）。暖かさの指数は 38.9 ~ 59.3，寒さの指数は - 77.7 ~ - 56.9 の範囲であった（岩本ら，1973）。また，地質はいずれも安山岩であるが，土壌はⅢ区が褐色森林土，Ⅳ区が暗色森林土，

表 - 1 各試験区における気象条件。1：岩本ら（1973），2：北海道演習林（1977）のデータに基づく。
Table 1. Climate conditions of each plot. 1: IWAMOTO *et al.* (1973), 2: UNIVERSITY OF FOREST IN HOKKAIDO (1977).

試験区	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	Ⅳ区
標高(m)	547	728	933	1135
年平均気温 ¹	5.3	4	3	1.8
年平均湿度 ²	79.4	75.0	83.3	76.0
最大積雪深(cm) ²	140	160	248	280
寒さの指数 ¹	-56.1	-63.9	-69.9	-77.7
暖かさの指数 ¹	59.3	51.5	45.5	38.9

表 - 2 調査対象とした11樹種の種子産地と植栽本数。種子産地については安達ら(1985)、植栽本数については、岩本ら(1973)の値を示した。なお、植栽本数は反復が区別されていないため、二つの反復の合計値が示されている。

Table 2. Seed sources and the number of trees planted of all 11 species. Seed sources are derived from ADACHI *et al.* (1985) and the number of trees planted was shown in IWAMOTO *et al.* (1973). The number of trees planted was pooled for replication.

樹種	種子産地		植栽本数			
	地域	標高(m)	I区	II区	III区	IV区
トドマツ	山部99a	400	464	445	465	461
エゾマツ	山部7b	500	448	461	459	447
アカエゾマツ	山部8b	700	461	471	451	455
カラマツ	宇都宮営林署(日光系)		449	462	465	441
グイマツ	稚内営林署(沼川)		451	459	472	431
グイマツ雑種F1	山部植栽		458	463	446	448
シラカンバ	山部27c	330	462	448	452	446
ケヤマハンノキ	山部74a	260	473	471	463	450
チョウセンカラマツ	山部植栽		451	456	484	446
チョウカラ雑種F1	山部植栽		463	482	471	452
ストローブマツ	山部植栽		455	445	461	452

区と区が山岳黒色土であった(北海道演習林, 1977)。

各区1.5haには、設定当時は北方樹種15種(自生種5種, 導入種8種, 雑種2種)が基本的に1樹種あたり0.1ha, 7列×32行×2反復(計448本)で植栽された。これらの15樹種のうち、導入種であるアメリカカラマツ(*Larix occidentalis*), シベリアカラマツ(*L. sibirica*), ヨーロッパアカマツ(*Pinus sylvestris*), バンクシヤマツ(*P. banksiana*)の4種の原植本数と植栽面積は他の樹種の半分であり、岩本ら(1973)でも対象とされていない。また、アメリカカラマツを除く3種は20年時で全滅している(安達ら, 1985)。そこで本研究でも、これら4種を除く11種を対象とした。なお、本研究では、ニホンカラマツ(*L. kaempferi*)をカラマツ, グイマツ×ニホンカラマツ(*L. gmelini* × *kaempferi*)をグイマツ雑種F1, チョウセンカラマツ×ニホンカラマツ(*L. gmelini* var. *olgensis* × *kaempferi*)をチョウカラ雑種F1と略称する。本研究で対象とした11種の種子産地(安達ら, 1985)と植栽本数(岩本ら, 1973)を既存の報告を参考に表-2にまとめた。11樹種で区を合計すると、20,116本もの数の苗木が植栽された大規模な試験地といえる。

各区の現在の林況に関して、区ではトドマツ, エゾマツ, アカエゾマツ, ストローブマツ, グイマツ雑種F1, チョウカラ雑種F1, シラカンバの7種で林冠がうっ閉していた。また、カラマツとグイマツ, チョウセンカラマツの3種では隣接する植栽木間での競合が一部でみられた。植栽木が競合する状態にはなかったのはケヤマハンノキのみであった。区ではトドマツ, エゾマツ, アカエゾマツ, グイマツ雑種F1, シラカンバの5種で林冠がうっ閉状態にあった。また、グイマツ, チョウカラ雑種F1, ストローブマツの3種では天然更新したダケカンバとの競合が一部でみられた。カラマツ, チョウセンカラマツ, ケヤマハンノキの3種は植栽木の密度が低く, 各々が競合することなく生育していた。区で林冠がうっ閉していたのはエゾマツ, アカエゾマツ, グイマツ雑種F1の3種のみであった。トドマツとグイマツの2種では、隣接する植栽木間または天然更新したダケカンバとの競合が一部でみられた。その他の6種は残存する植栽木が少なく, 成林しているとは言い難い状況であった。区ではアカエゾマツのみ林冠のうっ閉が観

察された。また、グイマツ雑種 F1 で隣接する植栽木間での競合が、エゾマツで天然更新したダケカンバとの競合が、それぞれ一部にみられた。区は区に比べてトドマツやカラマツのように全滅した樹種が多く、それらの場所は完全にササ原となっていた。

調査方法

2008年8月初旬、各区において11種、樹高130cm以上の全生存個体の胸高直径、林縁を除いて任意に選んだ30個体(30個体以下の場合は全個体)の樹高を測定した。胸高直径は直径巻尺、樹高はVERTEX3(Haglöf社製)を用いて測定した。

統計解析

統計解析には、データ解析環境 R ver. 2.15.0 を用いた(R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012)。生存率については、岩本ら(1973)が示した全体の原植本数に対する調査時点での生存本数の割合を生存率とした。岩本ら(1973)、安達ら(1985)でも反復は区別せず、まとめた形で生存率が計算されているため、本研究でも同様に生存率を算出した。そして、一般化線形モデルを用いて植栽標高が生存率に及ぼす影響を樹種ごとに評価した。応答変数(生存/死亡)は二項分布に従うとして、連結関数はlogitを用いた。

胸高直径と樹高については、樹種ごとに試験区ごとの分布を箱ひげ図を作成して視覚化し、各樹種における標高と胸高直径および樹高の関係を調べた。

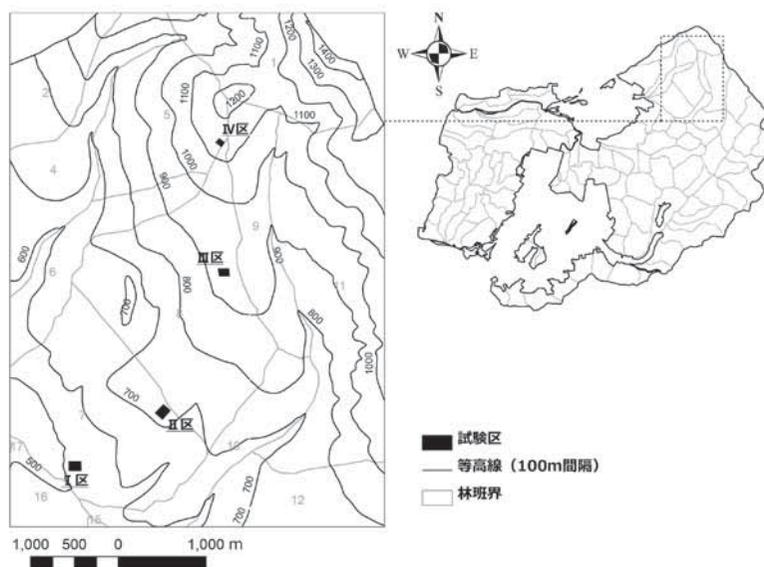


図 - 1 寒冷地適応試験地の位置。

Fig. 1. Location of the cold adaptation test plantation.

. 結 果

生存数の推移

11種の5年目, 10年目, 20年目, 45-47年目の樹種別の生存数の推移を図-2に示す。5年目と10年目, 20年目の生存数は, 植栽本数に岩本ら(1973)と安達ら(1985)で示された生存率をそれぞれ掛け合わせて算出した。各試験区について植栽からの年数と生存数の推移をみていくと, 区ではカラマツ, ギイマツ, ケヤマハンノキ, チョウセンカラマツ, チョウカラ雑種F1, ストローブマツの6種では植栽から20年の間に急激に生存数が減少し, その後は漸減した。トドマツとエゾマツの生存数はほぼ直線的に減少し, アカエゾマツ, ギイマツ雑種F1, シラカンバの3種の減少傾向はそれらの中間的であった。区では, 区と同じ6種にトドマツを加えた7種の生存数が植栽から20年の間に大きく減少し, その後漸減する傾向を示した。区ではこれら7種にシラカンバを加えた8種がこのパターンを示した。一方, 区ではほとんどの樹種がこの傾向を示し, ほぼ直線的に生存数が減少したのは, アカエゾマツのみであった。

次に, 樹種ごとに各区の生存数の推移をまとめると, トドマツは区, 区, 区と区がそれぞれ異なり, 区と区は類似したパターンを示した。エゾマツ, ギイマツでは区, 区,

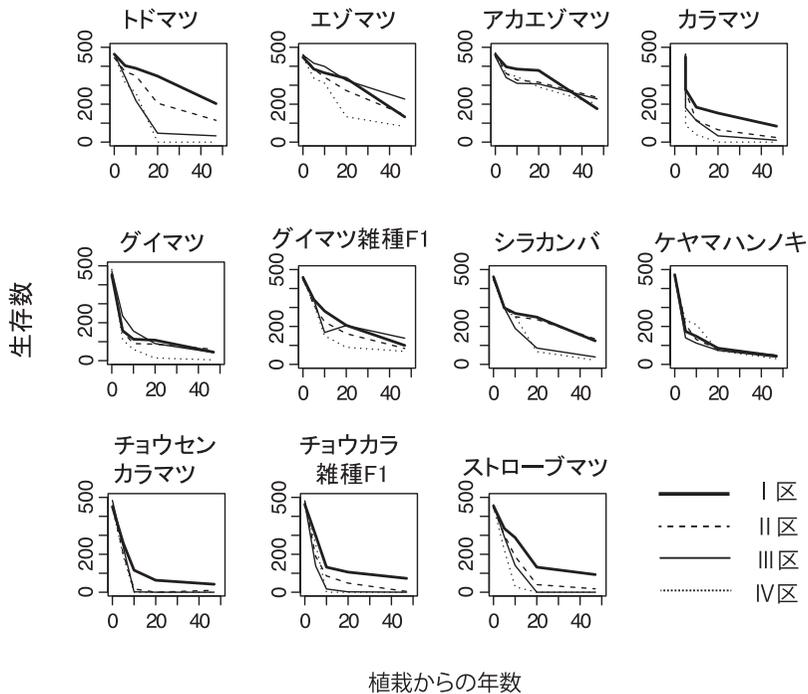


図-2 植栽から5年, 10年, 20年, 45-47年の生存数。5年と10年は岩本ら(1973), 20年は安達ら(1985)のデータを用いた。

Fig. 2. Number of surviving trees at 5, 10, 20 and 45-47 years after planting. Survival rate data for 5 and 10 years were derived from IWAMOTO *et al.* (1973) and data for 20 years were derived from ADACHI *et al.* (1985).

表 - 3 樹種ごとにみた各試験区の生存数，胸高直径，樹高．胸高直径と樹高は被害木や被圧木を除いた平均値を示した。

Table 3. Surviving trees, diameter at breast height (d.b.h.) and height of all 11 species in each plot. Averages of d.b.h. and height were calculated by excluding damaged or suppressed trees.

樹種	I 区			II 区			III 区			IV 区		
	生存数	胸高直径	樹高									
トドマツ	203 (43.8)	23.4	21.5	115 (25.8)	26.3	18.0	33 (7.1)	27.4	15.1	0 (0)	-	-
エゾマツ	133 (29.7)	20.5	19.8	144 (31.2)	21.9	16.3	227 (49.5)	21.8	15.0	82 (18.3)	12.4	8.6
アカエゾマツ	176 (38.2)	18.7	18.3	236 (50.1)	21.1	17.3	228 (50.6)	21.3	15.0	201 (44.2)	16.3	10.5
カラマツ	84 (18.7)	30.4	24.6	24 (5.2)	37.8	20.4	10 (2.2)	36.4	17.5	0 (0)	-	-
グイマツ	45 (10.0)	25.9	18.4	60 (13.1)	26.7	16.9	43 (9.1)	24.1	13.0	4 (0.8)	17.8	6.4
グイマツ雑種F1	100 (21.8)	25.6	22.8	84 (18.1)	24.7	17.9	138 (30.9)	24.9	16.5	69 (15.4)	23.5	12.6
シラカンバ	124 (26.8)	23.3	22.9	134 (29.9)	18.3	18.1	39 (8.6)	15.8	11.0	22 (4.9)	11.2	8.9
ケヤマハンノキ	44 (9.3)	23.8	19.8	48 (10.2)	21.4	15.4	39 (8.4)	19.7	11.6	30 (6.7)	13.3	7.8
チョウセンカラマツ	42 (9.3)	27.9	22.7	10 (2.2)	34.3	17.4	0 (0)	-	-	0 (0)	-	-
チョウカラ雑種F1	73 (15.8)	29.4	23.3	4 (0.8)	35.0	16.9	0 (0)	-	-	0 (0)	-	-
ストローブマツ	93 (20.4)	35.6	25.1	18 (4.0)	38.6	18.6	0 (0)	-	-	0 (0)	-	-

区は類似していたが，区が他とは異なる傾向を示した。シラカンバは区と区，区と区の減少傾向がそれぞれ類似していたが，それらは互いに大きく異なっていた。カラマツ，チョウセンカラマツ，チョウカラ雑種 F1，ストローブマツは区のみが異なり，，区が類似した減少傾向を示した。アカエゾマツ，グイマツ雑種 F1，ケヤマハンノキは区から区までの生存数の減少傾向に大きな違いがなかった。なお，一部の樹種や試験区で，生存数が過去よりも多くなるという逆転現象が認められた。例えば，グイマツ雑種 F1 の区における生存数を 10 年目と 20 年目で比較すると，20 年目の方が 10 年目よりも多くなっている。今回の調査において，グイマツ雑種 F1 の中には，若齢期に幹の根元回りを半分以上ネズミに食害されながらも，成木となっている個体が認められた（後藤・松井，観察）。したがって，ネズミ等による食害で 10 年時には死亡と判定されていたものが実は生存しており，20 年時には生存個体として認識されたため，このような逆転が起こったのではないかと推察された。また，チョウセンカラマツの 20 年目で生存していたのは区のみで，，区では全滅したとされていたが（安達ら，1985），今回の調査において，区で 10 個体のチョウセンカラマツが生存していることが判明した。これはおそらく 20 年目の時点では何らかの被害を受けた個体がササの下に埋もれて試験区の全個体が死亡したと判定されたが，20 年目から今回の調査までの間にそれらの生存個体の樹高がササよりも高くなったことで生存していることが分かったのではないかと考えられる。

植栽から 45-47 年後の生存と成長

本調査の結果を表 - 3 にまとめた。生存率に着目すると，区ではトドマツ，アカエゾマツ，エゾマツ，シラカンバ，グイマツ雑種 F1，ストローブマツの 6 種が 20%以上の生存率を示したが，区で 20%以上の生存率を示したのはトドマツ，アカエゾマツ，エゾマツ，シラカンバの 4 種のみであった。また，区で 20%以上の生存率を示した樹種はアカエゾマツ，エゾマツ，グイマツ雑種 F1 の 3 種，区で 20%以上の生存率を示したのはアカエゾマツのみであった。

区ではストローブマツ，チョウカラ雑種 F1，チョウセンカラマツの 3 種，区ではこれら 3 種に加えてトドマツの 4 種の生存個体はゼロであった。

胸高直径の平均値についてみると，区の上位 3 種はストローブマツ，カラマツ，チョウカラ雑種 F1，区ではストローブマツ，カラマツ，チョウカラ雑種 F1，区ではカラマツ，トドマツ，グイマツ雑種 F1，区ではグイマツ雑種 F1，グイマツ，アカエゾマツであった。以上の

ように、低標高地では導入種であるストロームツとカラマツ類、高標高地ではカラマツ類と自生針葉樹が上位を占めた。

樹高の平均についてみると、区でストロームツ、カラマツ、チョウカラ雑種 F1、区でカラマツ、ストロームツ、シラカンバ、区でカラマツ、グイマツ雑種 F1、トドマツ、区でグイマツ雑種 F1、アカエゾマツ、シラカンバであった。多少の順位の変動はあるが、胸高直径と類似した結果となった。

最後に、胸高断面積合計についてみると、区でストロームツ、トドマツ、カラマツ、区でアカエゾマツ、トドマツ、エゾマツ、区でエゾマツ、アカエゾマツ、グイマツ雑種 F1、区でアカエゾマツ、グイマツ雑種 F1、エゾマツであり、胸高直径や樹高とは異なり、区以上では自生針葉樹とグイマツ雑種 F1 が上位を占めた(図 - 3)。

標高と生存率、胸高直径、樹高の関係

試験地の標高と生存率を図 - 4 に示した。生存率は多くの樹種で標高が上がるほど低下し、特に、トドマツ、シラカンバ、チョウセンカラマツ、チョウカラ雑種 F1、ストロームツ、カラマツで顕著であった。一方、エゾマツ、アカエゾマツ、グイマツ雑種 F1、ケヤマハンノキでは明瞭な傾向が認められず、標高の効果は有意ではなかった(図 - 4)。

11 樹種について、各試験区における胸高直径と樹高の分布を箱ひげ図を用いて、図 - 5 と図 - 6 に示した。胸高直径は標高が上がるほど低下する樹種(シラカンバ、ケヤマハンノキ)と区や区よりも区や区で胸高直径が大きい樹種(エゾマツ、アカエゾマツ)が認められた。

区で生存個体がなかったトドマツとカラマツは、区よりも区や区の方が胸高直径が大きかった。また、区と区の生存個体がなかったチョウセンカラマツ、チョウカラ雑種 F1、ストロームツは、いずれも区よりも区の胸高直径の方が大きかった(図 - 5)。

全ての樹種で標高が高いほど、樹高は低くなった(図 - 6)。その中で、他の樹種と比較すると、エゾマツ、アカエゾマツ、グイマツの3種は低標高と高標高の樹高の差が顕著ではなかった。

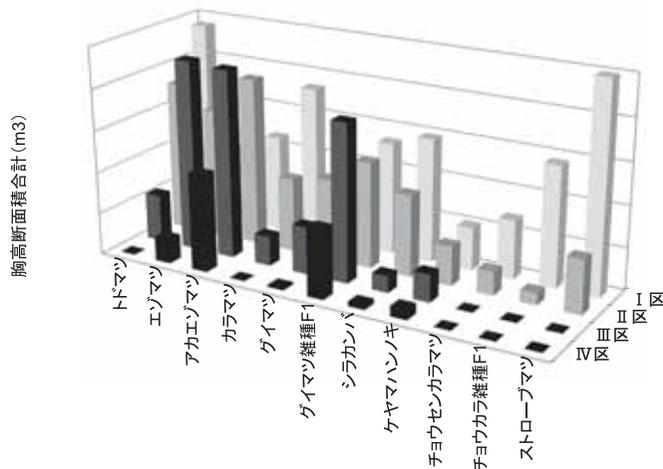


図 - 3 樹種ごと試験区ごとの胸高断面積合計

Fig. 3. Total basal area of all 11 species and each plot.

. 考 察

高標高地の造林に適した樹種

本研究の結果、多くの樹種で、標高が高いほど生存率が低下する傾向が認められた(図 - 4)。特に 700m 付近の 区以上になると生存率が 20%に満たない樹種が半数を超え、900m 付近の 区と 1,100m 付近の 区で 20%以上の生存率を示したのはアカエゾマツ、エゾマツ、グイマツ雑種 F1 の 3 種のみであった(表 - 3)。胸高断面積合計でも、 区で高い値を示したのはこれらの 3 種で、トドマツ、グイマツ、ケヤマハンノキ、カラマツなどが続いた(図 - 3)。アカエゾマツは 区でも 4 割程度の生存率を示し、1,000m を超えるような高標高地でも成林する可能性があることが明らかになった。

岩本ら(1973)は、経済的造林の標高限界をストローブ、ケヤマハンノキが 500m、ニホンカラマツ、シラカンバが 600m、トドマツ、エゾマツが 700m、グイマツ、グイマツ雑種 F1 が

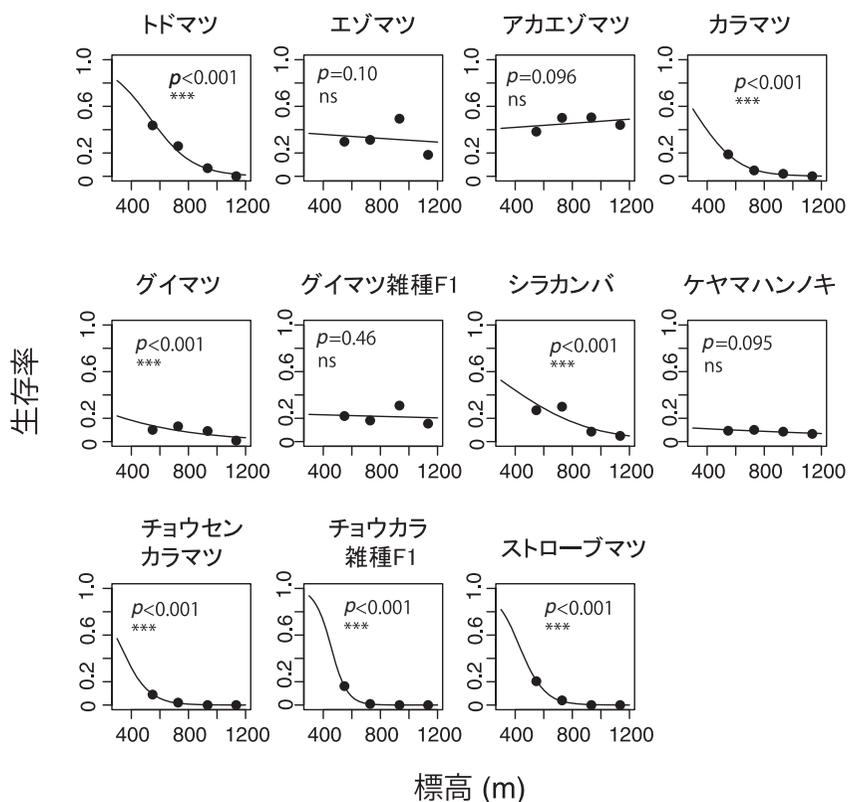


図 - 4 標高と生存率の関係。一般化線形モデルで推定した曲線を描いた。p 値は標高が生存率に及ぼす効果の有意確率を示す。ns: 有意でない, *: 5% 水準で有意, **: 1% 水準で有意, ***: 0.1% 水準で有意であることを示す。

Fig. 4. The relationship between altitude and survival rate. The curve was drawn using an equation derived from a generalized linear model (GLM). The p-value represents significance of effects for altitude on survival rate; ns: not significant, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

800m, アカエゾマツが900mとしている。岩本ら(1973)がどのような根拠でこのように100m単位で標高限界を提案したのかについては詳しく述べられていないが, トドマツとエゾマツが同じ標高域, ギヤマツとギヤマツ雑種F1が同じ標高域となっている点を除けば, 高標高域の造林に適する樹種としてエゾマツ, アカエゾマツ, ギヤマツ雑種F1が候補に入っている点は今回と一致している。一方, 安達ら(1985)は, 外来種(ストローブマツ, チョウセンカラマツ類)は500m以上の高標高域での生育がおぼつかないとしているほか, 自生する広葉樹であるシラカンバとケヤマハンノキは植栽時の不活着の影響が大きかったことを考慮し, 700m程度までが造林可能だとしている。この指摘は, 本研究の結果と矛盾しない。

北海道演習林で1992年から2012年までに造林した190箇所の100m標高階別の造林面積の累計を図-7に示した。最近の造林ではトドマツとアカエゾマツ, エゾマツとアカエゾマツなど混合で造林することも多いが, 今回は単一樹種と混合樹種の区別ができなかったため, 造林台帳に記載されている樹種名で分類した。図-7によると, 北海道演習林では標高301~700mの範囲に多く造林されており, 特に601~700mの造林面積が最も多い。この図を見る限り, 標高700m以上でトドマツの造林面積が少ない以外は, 3種の造林標高に目立った特徴はない。しかし, 北海道演習林第13期教育研究計画では, 低標高域の天然林第1作業級では, 樹種は主

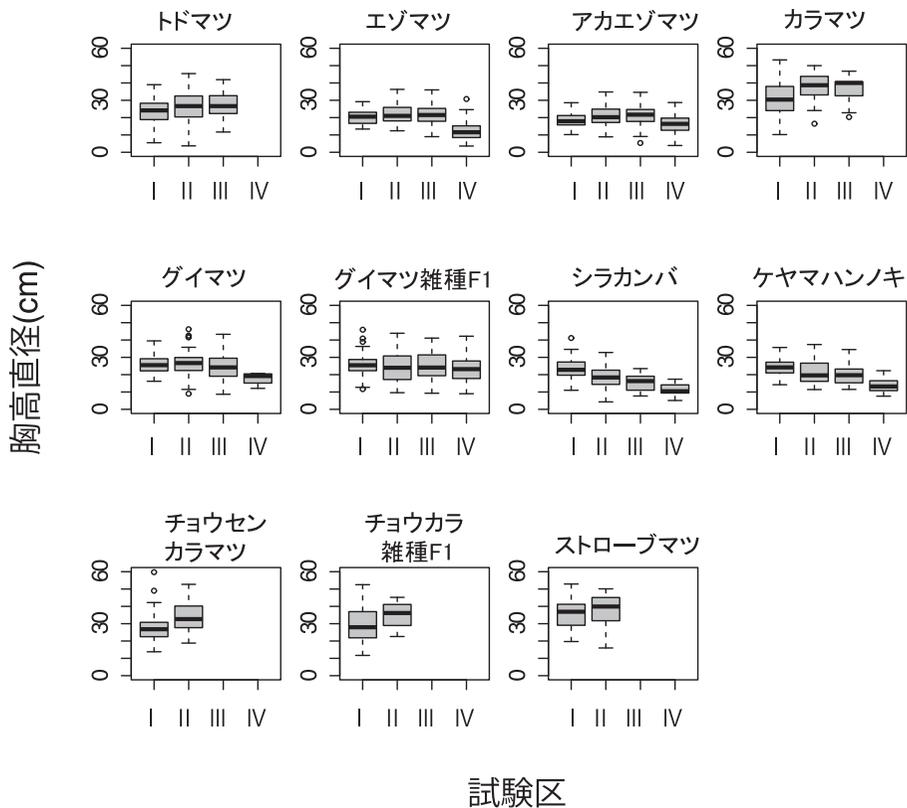


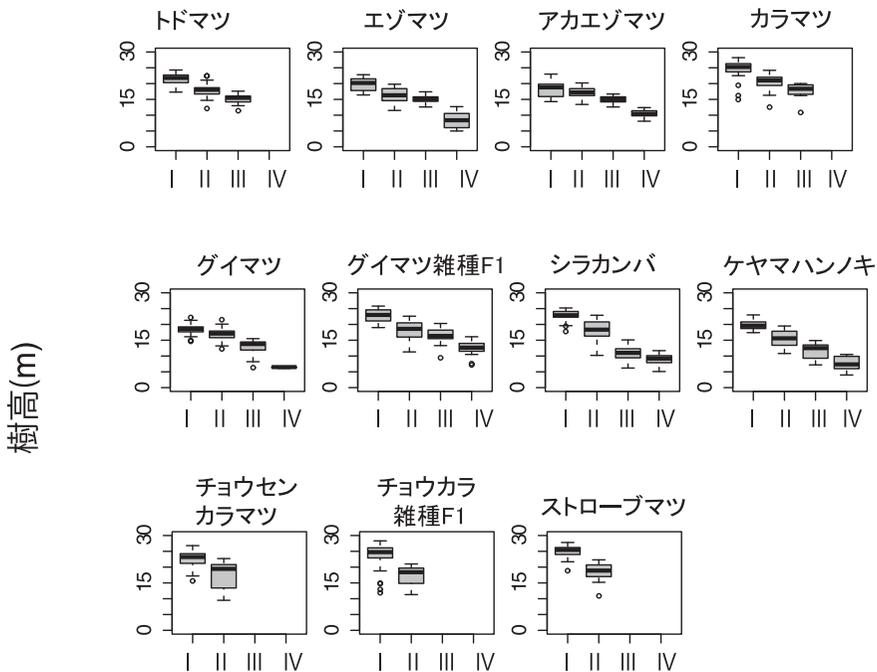
図-5 各樹種の試験区における胸高直径の分布

Fig. 5. Distribution of diameter at breast height for 11 species at each site.

にトドマツとし、エゾマツ類を 20% 程度混植することを基本、中標高域の天然林第 2 作業級では樹種は主にエゾマツ類とし、トドマツ類を 30% 程度混植することを基本とし、いずれも各々の立地に適した樹種や混交比率とするという方針が明確になっている（東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林, 2012）。今回の結果は、この方針を支持する結果といえる。

図 - 7 が示すように、北海道演習林では 1992 年から 2012 年までの 20 年ほどは標高 800m 以上に造林してこなかった。これは、大規模な台風被害後の植生回復のために低標高から復旧造林をしてきたこと、800m 以上の標高では造林しても成林しないのではないかとという危惧があったことなどが影響していると推測される。しかし、800m 以上の高標高地では、ササ類（主にチシマザサ）がいったん繁茂してしまうと、自然状態のままではササ原の状態がずっと続き、森林へと誘導するのは困難である。したがって、これまでは造林がなされてこなかった 800m 以上の高標高地への造林のチャレンジも今回の結果をもとに、十分に検討する余地があると考えられる。

10 年目（岩本ら, 1973）、20 年目（安達ら, 1985）の結果では、高標高地造林に適する樹種として、エゾマツ、アカエゾマツ、グイマツ雑種 F1、トドマツ、グイマツの 5 種が挙げられている。本研究では、成林可能性を評価する上で、生存率が一定以上で、胸高断面面積合計が大きいことを判断の基準とした。トドマツとグイマツでは、区の生存率はそれぞれ 7.1% と 9.1%、



試験区

図 - 6 11 樹種の試験区における樹高の分布。

Fig. 6. Distribution of the tree height for 11 species at each site.

区の生存率は0%と0.8%であった。一方、エゾマツ、アカエゾマツ、グイマツ雑種F1の3種は、区の生存率はいずれも30%以上、区は15%以上であり、トドマツとグイマツと残りの3種の間には大きな違いが認められた(表-3)。胸高断面積合計に着目すると、エゾマツ、アカエゾマツ、グイマツ雑種F1はトドマツとグイマツを含めた他の8種と比べて、区と区のいずれでも突出しており(図-3)、前述したように、現地調査でもこれらの3種のみが成林しているという印象があった。以上の結果を踏まえると、今回の調査では、エゾマツ、アカエゾマツ、グイマツ雑種F1の3種が高標高地造林でも成林する可能性が高いと判断され、10年時(岩本ら, 1973)や20年時(安達ら, 1985)に比べて、より絞り込まれた結果となった。

自生針葉樹の天然分布と造林可能標高

本試験地を設定した大麓山南西斜面ではトドマツ、エゾマツ、アカエゾマツの3種が天然分布し、トドマツ-オシダ群集とエゾマツ-ネマガリダケ(チシマザサ)群集が標高700mを境に山腹斜面を上下に棲み分けている(加藤, 1952)。アカエゾマツは2種が生育できないような湿地帯や蛇紋岩帯などに隔離分布するほか、標高1,200m以上の山頂付近に大きな集団を形成している。これら3種の胸高断面積合計を比較すると、トドマツは500m付近の区ではエゾマツやアカエゾマツよりも高い値を示しているが、700m付近の区以上の標高域ではエゾマツとアカエゾマツの方がトドマツよりも高くなっており、区以上になるとその差はさらに顕著になっている。すなわち、北海道演習林における標高分布と造林試験の結果に対応が見られる。柴田・岩本(1973)によれば、トドマツでは高標高地での枝枯れ病被害と雪害が発生しているのに対し、エゾマツとアカエゾマツではあまり被害が発生しておらず、高標高地特有の生物害や気象害に対する耐性の違いが今回の結果に関わっている可能性がある。

ただし、安達ら(1985)が指摘するように、これら自生針葉樹の造林可能範囲を決める上で、種子産地の標高の影響は無視できないものがある。特に、トドマツについては標高間の相互移植試験の結果から、種子産地と植栽地の標高差が大きいほど、生存率と平均樹高が低下することが

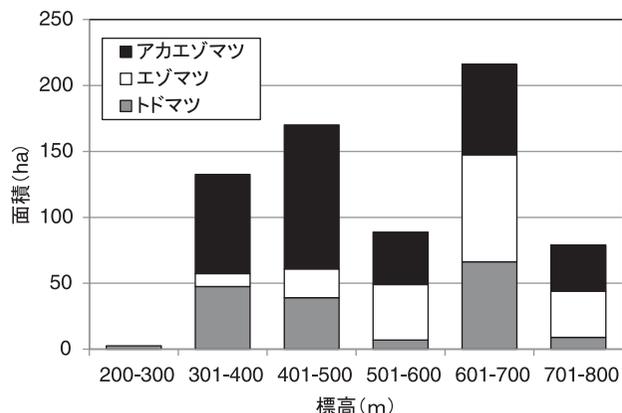


図-7 100m 標高階ごとの造林面積。1992年から2012年までに北海道演習林で造林した樹種別の面積合計を示した。

Fig. 7. Histogram of plantation area along the 100m-altitude interval. Data were derived from the plantation area of conifers in the University of Tokyo Hokkaido Forest during the period 1992 to 2012.

指摘されている（倉橋・浜谷，1981；ISHIZUKA and GOTO,2012）。したがって，トドマツの高標高地造林では，高標高産の種苗を用いれば結果が変わる可能性がある（ISHIZUKA and GOTO,2012）。しかし，今回のように事業用の低標高産種苗を用いる限り，トドマツを高標高地造林に用いるのには問題があるといえる。一方，エゾマツの種子産地は600m，アカエゾマツの種子産地は700m付近の標高であった。それにもかかわらず，エゾマツとアカエゾマツは900m付近の区で比較的良好な成績を示し，特にアカエゾマツは1,100m付近の区でも良好な生存率を示した。アカエゾマツの場合，690mと1,080mの2つの異なる標高に由来する種苗を同じ場所に植えても生存率や成長に有意な違いがないとする報告がある（後藤ら，2011）。また，エゾマツでは，420，700，1,200mの異なる3つの標高に由来する種苗を植栽した2箇所の産地試験地（610mと750m）において，開芽期の早遅は植栽地の標高に影響されるが，産地標高の影響は見い出せなかったとされている（NAKAGAWA *et al.*, 2003）。もしかすると，エゾマツとアカエゾマツでは，トドマツに比べて，種子産地の標高によらずに造林適応幅が大きい可能性があるが，それを検証するにはトドマツと同様に標高間の相互移植試験を行う必要がある。

以上のように，自生針葉樹の中では，エゾマツとアカエゾマツが高標高地造林に適した樹種といえるが，いずれの樹種も45年以上の年数が経過しているながら，胸高直径の平均値が22cm未満と小さいのが林業的な観点からの課題といえる。本研究の値自体は，寒冷地適応試験という性質上，間伐を行わなかったことが影響していると考えられる。したがって，実際にエゾマツやアカエゾマツを高標高地に造林し，通常の除間伐等の保育作業を行った場合に，どのような成長をするのかを明らかにする必要がある。いずれにしても，風害跡地などで800m以上の高標高地のササ地を天然林に還元するような目的に合った造林樹種としては，アカエゾマツとエゾマツが有望であり，1,000mを超えるような，より高標高地では，アカエゾマツの方がより安全であると考えられた。

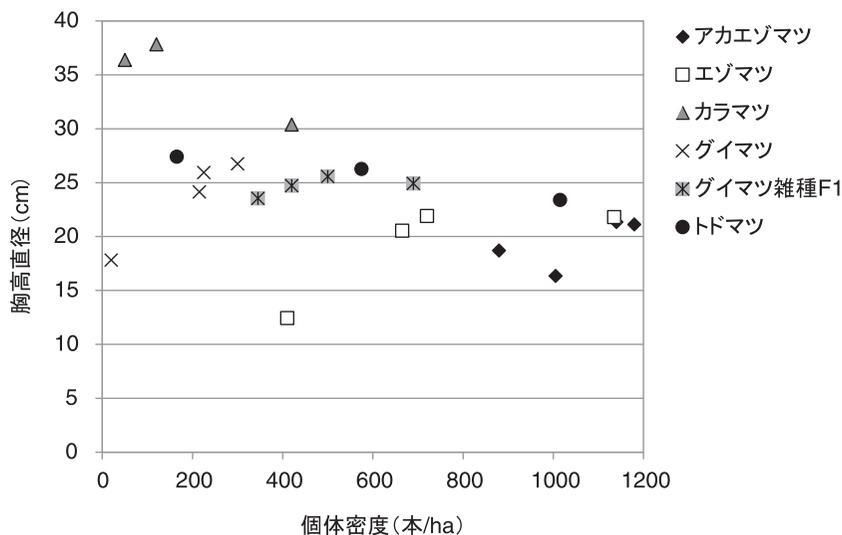


図 - 8 各試験区における針葉樹6種の個体密度と平均胸高直径の関係

Fig. 8. The relationship between plot density and mean diameter at breast height of six coniferous species at each site.

カラマツ類の利用可能性

北海道では厳しい気象環境でも造林可能な樹種候補として、カラマツ類が古くから着目され、耐鼠性、耐病性、気象害抵抗性に関する選抜育種、導入育種、交雑育種が行われた（北海道林木育種協会, 2008）。チョウセンカラマツ類については、10年生の時点で降雪地帯ではエンケリオブシス胴枯れ病による被害が大きく、高標高地の造林には不適だと結論されており（柴田・岩本, 1973）、今回の結果をみてもチョウセンカラマツ類を今後造林する可能性はないといつてよい。

カラマツでは、区間の平均胸高直径が30cmを超えており、この標高にしては他の樹種と比べると大きい。したがって、カラマツの生存率を上げることができれば、造林樹種としては有望になる可能性は否定できない。ただし、胸高直径は立木密度の影響を強く受けることが知られている。そこで、カラマツ、グイマツ、グイマツ雑種F1、トドマツ、エゾマツ、アカエゾマツの6種について、立木密度と平均胸高直径の散布図を描いた結果、カラマツとトドマツのみ立木密度が低いほど平均胸高直径が大きいという傾向が認められた（図-8）。その他の樹種では、そのような傾向は認められず、立木密度以上に環境の好不適が胸高直径に影響しているのではないかと考えられた。いずれにしても、カラマツの場合は生存率が高まれば、立木密度が高くなるために、今回得られたような大きな胸高直径にならない可能性がある。

また、柴田・岩本（1973）によれば、カラマツの野鼠害は区と区間の平均で14.1%であったのに対し、グイマツで平均0.8%、グイマツ雑種F1で平均0.8%と明らかな違いがある。今回、カラマツの野鼠被害が高標高地で大きいのは、樹皮食するエゾヤチネズミの密度が高標高ほど高いのではないかと考え、2009年の10月21日と22日の2日間トラップをしかけた。ところが、区間で合計20頭、区間で10頭、区間で15頭、区間で14頭であり、高標高ほどエゾヤチネズミの密度が高いという関係は見い出せなかった（松井, 未発表）。したがって、カラマツは標高に関わらず野鼠害を受けるが、高標高では他の生物害や気象害の影響も受けるために、低標高よりも死亡しやすいのではないかと考えられた。

以上のように、カラマツの成長の良さは魅力的ではあるが、高標高地での生存率と胸高断面積合計の低さを考慮すると、造林するにはリスクが高いと結論せざるを得ない。一方、グイマツ雑種F1は区間でも15.4%の生存率を示し、また区間の中では最も成長がよかった。以上のことを考えると、高標高地に造林可能でなおかつ経済的な価値も考慮する上では、グイマツ雑種F1が最も有望だといえる。最近、北海道立林業試験場では、成長が極めてよく通直性の高いグイマツ雑種F1を開発しており（来田, 2011）、このような育種種苗を使えば単に成林するだけでなく、林業的にも価値の高い森林を高標高地に造成できる可能性がある。

まとめ

東京大学北海道演習林の異なる4標高域に11樹種を植栽した試験から45～47年が経過し、高標高地でも造林可能な樹種として、エゾマツ、アカエゾマツ、グイマツ雑種F1の3種が選ばれた。自然植生を復元する目的で高標高地に造林するにはエゾマツかアカエゾマツを用いるのが適切で、標高1,000mを超えるようなより高い標高ではアカエゾマツが最適だと判断された。一方、経済的にも価値の高い森林を高標高地に造成したい場合、グイマツ雑種F1が最も有望だと考えられた。近年、グイマツ雑種F1では育種の改良が進んでおり、成長がよく、生物害、気象害抵抗性の高い品種を選択すれば、さらに高い経済効果が望める可能性がある。

謝 辞

本研究のデータを収集するのに当たり、多数の方々のご協力を賜った。特に、北海道演習林の技術職員の皆様には大変お世話になった。調査・計測では、犬飼浩、木村徳志、清水目元一、岡本ヒサヨ、宅間隆二、中川雄治、千徳勝洋、村川功雄、稲葉文吉、五十嵐秀雄の各氏をはじめとして、多くの方に協力していただいた。また、林道から 区までの下刈りでは、道上昭夫、大屋一美、小川瞳、安藤佳子、中坪優子、佐藤裕子、内芝和江の各氏にご尽力をいただいた。また、本原稿の審査者に貴重なご指摘を頂き、おかげで内容を改善することができた。これらの方々には厚くお礼を申し上げたい。本試験地は、元演習林長の故高橋延清名誉教授によって立案され、1952年の育苗開始から1981年に至る約30年間、種苗・造林掛と元麓郷作業所が中心となって管理と調査に当たり、その後も多くの先輩諸氏、教職員の尽力で維持管理されてきた。本論文をまとめるに当たり、改めて敬意を表したい。

要 旨

本研究では、東京大学北海道演習林の4標高(500m, 700m, 900m, 1,100m付近)に11樹種を植林し、植林から45年以上経過した時点の生存と成長を2008年に調べた。トドマツとニホンカラマツは低から中標高ではよい生存と成長を示したが、区以上の生存率が低く、区の生存個体数はゼロであった。したがって、高標高地でも造林可能な樹種として、エゾマツ、アカエゾマツ、グイマツ雑種F1の3種が選ばれた。自然植生を復元する目的ではエゾマツかアカエゾマツを用いるのが適切だが、例えば1,000m以上のような、より高標高地ではアカエゾマツの方がより安全だと考えられた。一方、経済的にも価値の高い森林を高標高地に造成したい場合、グイマツ雑種F1が最も有望だと考えられた。

キーワード；標高，生存率，胸高断面積，自生種，雑種F1

引用文献

- 安達守・倉橋昭夫・高橋康夫・岡村行治(1985)標高別植栽地における20年間の生育経過。北方林業37: 76-80.
- 後藤晋・小川瞳・石塚航・松井理生・木村徳志・岡村行治(2011)東京大学北海道演習林における採種地の違いがアカエゾマツ植栽個体の生存と成長に及ぼす影響。東大演報124: 107-118.
- ISHIZUKA W, GOTO S (2012) Modeling intraspecific adaptation of *Aibes sachalinensis* to local altitude and responses to global warming, based on a 36-year reciprocal transplant experiment. *Evol. Appl.*5: 229-244.
- 岩本巳一郎・柴田前・今野進(1973)標高別造林試験地の成績()。日林北支講22: 76-80.
- 加藤亮介(1952)北海道演習林の森林植生。東大演報43: 1-18.
- 倉橋昭夫・濱谷稔夫(1981)トドマツの垂直分布に伴う変異。東大演報71: 101-151.
- 小池孝良(2002)垂直分布における環境適応(樹木環境生理学。永田洋・佐々木恵彦編, 文英堂, 東京) 81-121.
- 北海道林木育種協会(2008)グイマツ・カラマツ(北海道における林木育種と森林遺伝資源。北海道林木育種協会編, 札幌)。27-60.
- 北海道演習林(1977)大麓山(前山)標高造林試験地における気象観測。演習林21: 22-47.

- 来田和人 (2011) カラマツ類の品種改良と地球温暖化対策 (北海道の森林, 北方森林学会編, 北海道新聞社, 札幌). 249-253.
- 増沢武弘 (2009) 高山植物学 - 高山環境と植物の総合科学, 共立出版, 東京, 445pp
- NAKAGAWA M, HIROKAWA T, SHIMA T, OGASAWARA S, KURAHASHI A (2003) Effect of seed source elevation on bud opening in Yezo spruce (*Picea jezoensis*). J For Res 8: 267-270.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2012) R: A Language and Environment for Statistical Computing, (<http://www.R-project.org/>)
- 柴田前・岩本巳一郎 (1973) 標高別造林試験地の成績 (). 日林北支講 22 : 80-85.
- 農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林 (2007) 北海道演習林第 12 期試験研究計画 (自平成 18 年度至平成 27 年度). 演習林 46 : 215-350.
- 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林 (2012) 北海道演習林第 13 期教育研究計画 (2011 (平成 23) 年度 ~ 2020 (平成 32) 年度). 演習林 51 : 67-176.
- 和田覚 (2007) スギ人工林の標高別成績と混交林化の実態 - 不成績造林地の判定と混交林化にむけて - . 山林 1477 : 28-35.

(2013 年 6 月 28 日受付)

(2013 年 9 月 18 日受理)

Summary

We investigated the survival and growth of eleven tree species in 2008, after the elapse of more than 45 years from their planting at four different altitudinal zones in the University of Tokyo Hokkaido Forest. Japanese larch and Todo fir exhibited good performance at low-to mid-altitudes but they suffered from severe damage at high-altitudes. We found that two native conifers *Picea jezoensis* and *P. glehnii*, and one larch hybrid (*Larix gmelini* x *kaempferi*) were suitable for planting in high-altitudinal zones in the University of Tokyo Hokkaido Forest. To recover native forests, two spruce species would be suitable for planting in these zones. *P. glehnii* was the most promising species for planting in higher altitudinal zones (c.a. >1,000 m alt.). To establish an economically-useful plantation, hybrid larch was the best candidate species due to its high survival and growth rates.

Key words; elevation, survival rate, total basal area, native species, hybrid

