

グイマツ雑種F₁とカラマツ次代検定林の成長と材質の変異

市村康裕^{*1}・来田和人^{*2}・藤本高明^{*3}・内山和子^{*4}・松本和茂^{*5}・黒丸 亮^{*2}

The variations of growth and wood properties of *Larix kaempferi* and the hybrid larch in Progeny tests.

Yasuhiro ICHIMURA, Kazuhito KITA, Takaaki FUJIMOTO, Kazuko UCHIYAMA,
Kazushige MATSUMOTO, and Makoto KUROMARU

要 旨

グイマツ雑種F₁とカラマツの建築用材への利用拡大を目的として北海道の東部に造成した次代検定林において成長形質である胸高直径、樹高、材質形質である丸太ヤング係数、幹曲り率の家系間変異を調べた。グイマツ雑種F₁では成長形質が母樹間、花粉親間で異なる傾向にあり、材質形質は母樹間で異なっていた。カラマツでは幹曲りが母樹間、花粉親間ともに違いがなく、成長形質、ヤング係数は検定林で結果が異なっていた。家系別の丸太ヤング係数はグイマツ雑種F₁が11.9~14.9GPa、カラマツが9.44~13.7GPaであり、建築用材として十分な強度を有していた。両樹種とも成長と材質に相関がなく、それぞれ独立して選抜できることが分かった。グイマツ雑種F₁の樹高、丸太ヤング係数、幹曲り率、カラマツの丸太ヤング係数の狭義の遺伝率は、0.09~0.53であり、他の形質より高い家系選抜の効果が認められた。

キーワード：建築用材、丸太ヤング係数、幹曲り率、成長、遺伝率、人工交配家系

はじめに

北海道において、母樹がグイマツ、花粉親がニホンカラマツの雑種F₁（以下グイマツ雑種F₁）およびニホンカラマツ（以下カラマツ）は主要な造林樹種の1つである。戦後盛んに造林されて現在利用齢級に達し、伐採が盛んに行われている。カラマツ類の用途は製材やパルプが多いが、製材としての利用も梱包材など強度を必要としない用途に多く用いられ、付加価値の高い建築材として利用されることは少なかった。カラマツ材の欠点とされてきたねじれ、材の堅さ、早晚材の密

度差は、乾燥・加工技術が発達し、それらの問題は相対的に低くなっている。(森泉 2006)。またロシアの輸出制限といった国際情勢の変化から、北海道ではカラマツを建築材として利用するよう見直されている。これまでの研究で、カラマツやグイマツ雑種F₁は材の強度が高く、建築用構造材として適していることは明らかになってきているが（北海道立林産試験場 2005,根井ら 2004）、強度のバラツキによって製品歩留りが上がらないことなどもあり、カラマツ材の高付加価値化につながっていない。そのため施業方法の改善や育種による材質の向上、均一化が必要となっている。

*¹ 北海道立林業試験場 079-0198 北海道美唄市光珠内町東山

Hokkaido Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-0198, Japan

(現所属) 宮城県庁 980-8570 宮城県仙台市青葉区本町3丁目8番1号 Miyagi Prefectural Government, Sendai, Miyagi 980-8570, Japan

*² 北海道立総合研究機構林業試験場 079-0198 北海道美唄市光珠内町東山

Hokkaido Research Organization Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-0198, Japan

*³ 鳥取大学農学部 680-8553 鳥取市湖山町南4丁目101 Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan

*⁴ 北海道立総合研究機構林業試験場道北支場 098-2805 北海道中川郡中川町字誉300

Dohoku Station of Hokkaido Forestry Research Institute, Nakagawa, Hokkaido 098-2805, Japan

*⁵ 北海道立総合研究機構林産試験場 071-0198 旭川市西神楽1線10号

Forest Products Research Institute, Asahikawa, Hokkaido, 071-0198, Japan

施業方法が材の強度に与える影響については、最近、間伐を積極的に行うことにより成熟材の割合が増加し材の強度が高くなるのがカラマツで明らかになった(安久津ほか2012)。一方、樹種内の家系間変異に着目した研究は、次代検定林が若齢であったため未成熟材の割合が高い若齢級での報告(大島・高橋1991, 大島・錦織1994, 大島・黒丸1995, 大島ら1997, 田村ら2004, 2005)は多いが、利用径級に達し成熟材が形成されている材料を対象とした研究は北海道西部の美唄市に造成したグイマツ雑種検定林1箇所に限られている(根井ら2005, 2006, Fujimoto *et al.* 2006a, 2006b, 2006c)。そこで本報では建築用材に適したカラマツやグイマツ雑種F₁の選抜に資するため、北海道東部の訓子府に造成し、利用径級に達したグイマツ雑種F₁およびカラマツの人工交配家系を対象に樹高、胸高直径、幹曲り、ヤング係数の家系間変異、遺伝率および形質間相関を評価し、それらの遺伝特性を明らかにすることを目的とした。優良家系の選抜結果とその効果については、来田ほか(2012)で報告した。

材料と方法

調査地は、北海道東部の常呂郡訓子府町に1974年と1977年に造成した2か所のグイマツ雑種F₁(グイマツ×カラマツ)人工交配家系次代検定林と、1974年と1977年に造成した2か所のカラマツ人工交配家系次代検定林である。検定林の名称は、それぞれ「雑種16号検定林」、「雑種26号検定林」、「カラマツ14号検定林」、「カラマツ27号検定林」である。交配親のグイマツ、カラマツはいずれも精英樹クローンである。雑種16号検定林とカラマツ14号検定林、雑種26号検定林とカラマツ27号検定林はそれぞれ互いに接している。雑種16号検定林は母樹グイマツ精英樹5クローン、花粉親カラマツ精英樹6クローン23家系(表-1a)、雑種26号検定林は母樹グイマツ4クローン、花粉親カラマツ10クローン36家系の要因交配である(表-1b)。ただし欠測家系があるため解析した組合せ数はそれぞれ23家系、36家系である。カラマツ14号検定林およびカラマツ27号検定林はカラマツ精英樹6クローンが雌雄両方の交配親となる6×6の両面ダイアレル交配であるが、欠測家系が多いため片面ダイアレル交配で欠測家系が最も少なくなるように解析家系を選んだ(表-1cおよび1d)。いずれの検定林も各家系2反復、プロットあたり21本(3列×7本)で、15年生時までに2残1伐の列状間伐を1回、その後定性間伐を1回行った。

雑種16号、雑種26号およびカラマツ27号検定林では31年生時に、カラマツ14号検定林で32年生時に成長形質である胸高直径と樹高を測定した。胸高直径はすべての検定林で毎木調査を実施した。樹高は、雑種16号検定林では毎木調査を実施したが、雑種26号検定林、カラマツ27号検定林およびカラマツ14号検定林では各プロット5本ずつの抽出調査を行った。

2007年に各家系6本を伐採し、材質形質である3.65mの1

番玉丸太のヤング係数と幹曲り率(末口径に対する最大矢高の比率)を測定した。雑種16号検定林と雑種26号検定林には16家系が共通であるため、両検定林からあわせて6本採取した。両検定林から採取した同じ家系の幹曲り率、ヤング係数は差異が見られなかったため材質に関しては2検定林あわせて43家系の材質を解析した(表-1e)。

樹高、胸高直径、幹曲り率および丸太ヤング係数の遺伝率を求めるため、反復、母樹、花粉親およびその交互作用を要因とする分散分析を行い、分散成分を計算した。分散成分を用いて、次の式により個体の遺伝率 h^2 を求めた。

$$h^2 = \frac{2(V_f + V_m) + 4V_{fm}}{V_e + V_m + V_f + V_m}$$

ここで V_f は母樹による分散成分、 V_m は花粉親による分散成分、 V_{fm} は母樹×花粉親の交互作用による分散成分、 V_e は誤差成分を表す。 V_f と V_m の項は、それぞれ母樹、花粉親による相加遺伝の効果を表す。上の式の分子にこの2項のみを用いて求めた遺伝率は狭義の遺伝率と呼ばれ、片親が決まれば、もう一方の親に関係なく遺伝する能力(一般組合せ能力(GCA))の高さを示す。そのため複数のクローンをランダムに植栽し自然交配で種子を生産する現在の採種園方式では、狭義の遺伝率が高ければ選抜効果が高くなる。一方、 V_{fm} の項は特定の母樹と花粉親の組合せによる非相加遺伝の効果を表し、特定組合せ能力(SCA)と呼ばれる。 V_{fm} の項を分子に含めて計算した遺伝率は、広義の遺伝率と呼ばれる。SCAが高ければ特定の組合せで子供の形質の値が良くなるので、2クローンだけで構成されたマイクロナル採種園やさし木、組織培養などの無性繁殖で改良効果が高くなる。カラマツの片面ダイアレル交配では、交配親が母樹と花粉親の両方になっているため、それら両親を合わせた相加遺伝分散(=両親を合わせた一般組合せ能力) $V_f + V_m$ を求めた。

また家系平均値には欠測家系や反復間のデータ数のアンバランスを補正した最小二乗平均値を用いた。

分散解析にはSASのGLMプロシジャ、MIXEDプロシジャ、IMLプロシジャおよびtransposeを用いた。カラマツ検定林における片面ダイアレル交配の分散成分の計算はXiang & Li(2001)の方法に従い上記プロシジャを用いて計算した。

形質間に相関がなければ、それぞれの形質を独立して選抜することが可能であるが、形質間に相関があればひとつの形質について選抜すると他の形質にも影響する。そこで形質間の関係をみるため、全兄弟家系の最小二乗平均値を用いて形質間の相関係数を求めた。全兄弟家系とは特定の1クローンの母樹と特定の1クローンの花粉親からなる兄弟群のことである。

表-1a 雑種16号検定林の交配組合せ

		花粉親					
		L01	L02	L03	L05	L10	L12
母樹	G1	○	○	○	○	○	○
	G2	○	○	○	-	○	○
	G3	-	○	○	-	○	○
	G4	-	○	○	-	-	-
	G5	○	○	○	○	○	○

○は解析対象家系、-は検定林に植栽がない欠測家系である。

表-1b 雑種26号検定林の交配組合せ

		花粉親									
		L01	L02	L03	L04	L07	L08	L09	L10	L12	L13
母樹	G1	○	○	○	○	○	-	-	○	○	-
	G3	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○
	G4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	G5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○は解析対象家系、-は検定林に植栽がない欠測家系である。

表-1c カラマツ14号検定林の交配組合せ

		花粉親				
		L11	L12	L10	L02	L01
母樹	L03	-	○	○	○	○
	L11		○	○	○	○
	L12			○	○	○
	L10				○	○
	L02					○

○は解析対象家系、-は検定林に植栽がない欠測家系である。

表-1d カラマツ27号検定林の交配組合せ

		花粉親				
		L06	L07	L09	L08	L01
母樹	L04	○	-	○	○	○
	L06		○	○	○	○
	L07			-	○	○
	L09				○	○
	L08					○

○は解析対象家系、-は検定林に植栽がない欠測家系である。

表-1e 雑種16号検定林と雑種26号検定林の材質調査に用いた交配家系

		花粉親										
		L01	L02	L03	L04	L05	L07	L08	L09	L10	L12	L13
母樹	G1	○	○	○	○	○	○	-	-	○	○	-
	G2	○	○	○	-	-	-	-	-	○	○	-
	G3	○	○	○	○	-	-	○	○	○	○	○
	G4	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○
	G5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○は解析対象家系、-は検定林に植栽がない欠測家系である。

結果

単木成長

雑種16号検定林における31年生の平均胸高直径は21.9cmであり、全兄弟家系毎の最小二乗平均値は18.2cm～25.8cmであった(表-2 a)。母樹間、花粉親間でいずれも有意な差があり(いずれも $p<0.05$)。母樹別、花粉親別の最小二乗平均値は、それぞれ20.7～23.7cm, 20.2～22.7cmであった。平均樹高は21.7mであり、全兄弟家系の最小二乗平均値は18.8m～23.6mであった。母樹間、花粉親間で有意な差があり(いずれも $p<0.01$)。母樹別、花粉親別の最小二乗平均値は、それぞれ20.8～22.4m, 20.2～22.8mであった(表-2 a)。

雑種26号検定林における31年生の平均胸高直径は19.8cmであり、全兄弟家系毎の最小二乗平均値は16.8cm～21.9cmであった(表-2 b)。母樹間、花粉親間でいずれも有意な差は見られなかった。平均樹高は20.1mであり、全兄弟家系の最小二乗平均値18.3m～21.5mの範囲であった。母樹間、花粉親間で有意な差があり(いずれも $p<0.01$)。母樹別、花粉親別の最小二乗平均値はそれぞれ19.6～20.4m, 19.3～20.7mであった。

カラマツ14号検定林における32年生の平均胸高直径は、20.2cmであり、全兄弟家系毎の最小二乗平均値は18.0cm～23.3cmであった(表-2 c)。母樹間で有意な差があり($p<0.05$)、母樹別の最小二乗平均値は19.0～21.0cmであった。平均樹高は21.5mであり、全兄弟家系毎の最小二乗平均値は20.4m～23.0mの範囲であった。母樹間で有意な差があり、母樹別の最小二乗平均値は、20.1～22.2mであった。

カラマツ27号検定林における31年生の平均胸高直径は21.1cmであり、全兄弟家系毎の最小二乗平均値は18.9cm～23.7cmの範囲であった(表-2 d)。花粉親間で有意な差があり($p<0.01$)、花粉親別の最小二乗平均値は18.7～23.3cmであった。平均樹高は21.5mであり、全兄弟家系毎の最小二乗平均値は19.7m～22.7mの範囲であった。母樹間、花粉親間にいずれも有意な差があり(いずれも $p<0.01$)。母樹別、花粉親別の最小二乗平均値は、それぞれ21.2～22.4m, 20.5～22.7mであった。

材質

グイマツ雑種 F_1 (雑種16号検定林と雑種26号検定林)の丸太幹曲がり率平均は21.3%であり、全兄弟家系別の最小二乗平均値は10.4～45.0%であった。(表-3 a)。母樹間に有意な差があり($p<0.01$)、幹曲り率の母樹別の最小二乗平均値は16.4～26.4%であった。丸太ヤング係数の平均は13.1GPaであり、全兄弟家系の最小二乗平均値は11.9～14.9GPaであった(表-3 a)。母樹間で有意な差があり($p<0.05$)、母樹別の最小二乗平均値は、12.6～13.6GPaであった。

カラマツ14号検定林の丸太幹曲がり率平均値は24.8%であり、全兄弟家系の最小二乗平均値は18.3～32.0%であった(表

-3 b)。幹曲り率では、母樹間、花粉親間とも有意な差がなかった。丸太ヤング係数の平均値は11.5GPaであり、全兄弟家系の最小二乗平均値は10.7～13.7GPaであった(表-3 b)。花粉親間で有意な差が見られ($p<0.05$)、花粉親別の最小二乗平均値は10.7～11.8GPaであった。

カラマツ27号検定林の丸太幹曲がり率は28.9%であり、全兄弟家系の最小二乗平均値は17.9～41.9%であった(表-3 c)。幹曲り率は母樹間、花粉親間で有意な差はなかった。丸太ヤング係数の平均値は11.1GPaであり、全兄弟家系の最小二乗平均値は9.4～12.4GPaであった。丸太ヤングでは母樹間で有意な差があり($p<0.01$)、母樹別の最小二乗平均値は10.0～11.9GPaであった。

遺伝率

雑種16号検定林における樹高の狭義の遺伝率は0.17で、その中でも花粉親によるものが母樹によるものよりも大きかった。また樹高のSCAが大きく、広義の遺伝率も0.55と大きかった(表-4 a)。一方、胸高直径では狭義の遺伝率は小さかった。雑種26号検定林における狭義の遺伝率は胸高直径が0.03、樹高が0.09で雑種16号検定林より小さかったが、胸高直径よりも樹高で遺伝率が高い、樹高でSCAが高く広義の遺伝率も大きい傾向は同じであった。幹曲り率と丸太ヤング係数の狭義の遺伝率(母樹由来、花粉親由来)はそれぞれ0.14(0.10, 0.04), 0.17(0.16, 0.01)であり、いずれも母樹のGCAによるものが大きかった(表-4 a)。広義の遺伝率でSCAに由来する値はそれぞれ0.15, 0.29であり、GCAと同等または大きかった。

カラマツの遺伝率は、カラマツ14号検定林のSCAに由来する丸太ヤング係数の広義の遺伝率が0.86、カラマツ27号検定林の丸太ヤング係数の狭義の遺伝率が0.53、SCAに由来する樹高の広義の遺伝率が1以上と高かったが、それ以外は低かった(表-4 b)。

形質間の相関

グイマツ雑種 F_1 では成長形質の胸高直径、樹高に有意な相関があったが($r=0.577$, $p=0.001$)、材質形質の丸太ヤング係数と幹曲り率には有意な相関が認められなかった。また成長形質と材質形質間には有意な相関がなかった(表-5 a)。カラマツではすべての形質間には有意な相関が認められなかった(表-5 b)。ただしカラマツでは統計的には有意ではないものの成長と材質に相関係数0.3前後のゆるやかな関係があった。

表-2a 雑種16号検定林の31年生胸高直径と樹高の最小二乗平均値

			花粉親						最小 二乗平均
			L01	L02	L03	L05	L10	L12	
母樹	G1	胸高直径(cm)	21.4	21.3	18.2	22.5	21.8	19.0	20.7
		樹高(m)	21.3	21.7	19.0	22.0	22.6	20.1	21.1
	G2	胸高直径(cm)	23.8	21.9	21.0		21.6	20.7	21.8
		樹高(m)	21.6	21.5	20.5		21.8	18.8	20.8
	G3	胸高直径(cm)		23.5	19.9		22.5	19.9	21.5
		樹高(m)		22.8	21.1		23.1	20.9	22.0
	G4	胸高直径(cm)		21.7	25.8				23.7
		樹高(m)		21.4	23.0				22.1
	G5	胸高直径(cm)	21.4	22.7	23.3	20.7	23.1	19.8	21.8
		樹高(m)	22.5	22.5	23.6	21.4	23.1	20.5	22.4
最小 二乗平均		胸高直径(cm)	22.6	22.1	21.6	22.3	22.7	20.2	21.9
		樹高(m)	22.0	21.9	21.4	21.7	22.8	20.2	21.7

表-2b 雑種26号検定林の31年生胸高直径と樹高の最小二乗平均値

			花粉親									最小 二乗平均	
			L01	L02	L03	L04	L07	L08	L09	L10	L12		L13
母樹	G1	胸高直径(cm)	18.8	18.3	19.7	17.3	19.3			18.7	19.4		19.0
		樹高(m)	20.3	19.4	19.7	18.3	19.2			20.0	19.3		19.6
	G3	胸高直径(cm)	18.8	19.1	19.1	19.8		19.5	21.1	21.8	16.8	20.2	19.6
		樹高(m)	19.3	19.3	21.4	19.5		20.5	21.2	21.4	18.6	20.6	20.3
	G4	胸高直径(cm)	18.5	17.7	20.6	21.0	20.6	20.9	21.9	20.0	20.8	21.6	20.2
		樹高(m)	20.2	20.2	19.5	20.3	19.7	21.5	20.4	21.0	20.2	20.1	20.3
	G5	胸高直径(cm)	19.7	20.6	20.7	20.9	21.7	18.7	21.2	21.6	18.7	19.9	20.3
		樹高(m)	21.3	20.7	19.9	20.7	20.9	20.1	20.3	20.6	19.1	20.2	20.4
最小 二乗平均		胸高直径(cm)	19.0	18.8	20.0	19.7	20.4	19.4	21.1	20.2	19.0	20.3	19.8
		樹高(m)	20.4	19.9	20.1	19.7	19.9	20.6	20.4	20.7	19.3	20.1	20.1

表-2c カラマツ14号検定林の32年生胸高直径と樹高の最小二乗平均値

			花粉親				最小 二乗平均
			L12	L10	L02	L01	
母樹	L03	胸高直径(cm)	19.6	22.6	21.0	21.3	21.0
		樹高(m)	20.7	22.8	21.2	22.6	21.7
	L11	胸高直径(cm)	19.5	18.0	19.7	19.4	19.2
		樹高(m)	21.9	20.4	22.8	22.1	21.8
	L12	胸高直径(cm)		23.3	21.2	19.9	21.0
		樹高(m)		22.2	21.4	22.0	21.6
	L10	胸高直径(cm)			18.8	19.4	19.0
		樹高(m)			23.0	22.1	22.2
	L02	胸高直径(cm)				20.6	20.6
		樹高(m)				20.4	20.1
最小 二乗平均		胸高直径(cm)	19.5	20.8	20.3	20.1	20.2
		樹高(m)	20.9	21.4	21.8	21.8	21.5

表-2d カラマツ27号検定林の31年生胸高直径と樹高の最小二乗平均値

			花粉親					最小 二乗平均
			L06	L07	L09	L08	L01	
母樹	L04	胸高直径(cm)	18.9		20.3	21.6	22.5	21.3
		樹高(m)	20.2		19.7	21.3	22.6	21.2
	L06	胸高直径(cm)		23.7	20.9	20.5	22.8	21.5
		樹高(m)		22.7	22.1	20.9	21.3	21.6
	L07	胸高直径(cm)				21.6	20.0	20.3
		樹高(m)				21.1	21.4	21.2
	L09	胸高直径(cm)				21.8	20.2	20.5
		樹高(m)				22.6	22.3	22.4
	L08	胸高直径(cm)					22.2	21.9
		樹高(m)					21.5	21.3
最小 二乗平均		胸高直径(cm)	18.7	23.3	20.4	21.8	21.4	21.1
		樹高(m)	20.5	22.7	21.3	21.5	21.7	21.5

表-3a 雑種16号検定林と雑種26号検定林の幹曲り率および丸太ヤング係数の最小二乗平均値

		花粉親										最小 二乗平均	
		L01	L02	L03	L04	L05	L07	L08	L09	L10	L12		L13
G1	幹曲り率 (%)	24.9	19.5	31.8	21.6	20.7	20.0			20.6	18.6		21.9
	丸太ヤング係数(Gpa)	14.9	13.9	12.6	13.3	13.1	13.9			13.6	13.5		13.6
G2	幹曲り率 (%)	28.6	20.2	33.2						20.4	15.4		22.7
	丸太ヤング係数(Gpa)	12.4	11.9	13.3						13.4	13.1		12.9
母樹 G3	幹曲り率 (%)	15.3	15.6	19.6	21.5			21.7	18.4	22.5	28.1	15.7	19.1
	丸太ヤング係数(Gpa)	13.2	13.4	12.7	12.6			13.4	12.9	13.2	12.2	13.3	13.1
G4	幹曲り率 (%)	30.4	20.9	25.3	32.3		31.4	14.2	44.7	45.0	14.6	17.6	26.4
	丸太ヤング係数(Gpa)	13.2	12.8	12.9	12.3		12.9	11.9	12.3	12.3	13.0	12.1	12.6
G5	幹曲り率 (%)	17.6	11.0	16.7	35.8	10.8	16.5	18.1	27.4	10.4	13.9	17.4	16.4
	丸太ヤング係数(Gpa)	13.4	13.8	13.1	12.3	13.7	14.5	13.8	14.2	12.3	12.2	13.0	13.3
最小 二乗平均	幹曲り率 (%)	22.2	16.9	23.8	26.8	16.6	21.5	17.7	31.2	23.4	17.8	17.0	21.3
	丸太ヤング係数(Gpa)	13.5	13.3	12.9	12.6	13.1	13.7	13.1	13.2	12.9	12.8	12.9	13.1

表-3b カラマツ14号検定林の幹曲り率および丸太ヤング係数の最小二乗平均値

		花粉親				最小 二乗平均
		L12	L10	L02	L01	
母樹 L03	幹曲り率 (%)	32.0	26.3	24.3	29.8	27.6
	丸太ヤング係数(Gpa)	11.6	10.7	11.9	12.1	11.6
L11	幹曲り率 (%)	23.1	27.2	19.3	18.3	21.2
	丸太ヤング係数(Gpa)	12.5	11.6	11.8	12.2	12.0
L12	幹曲り率 (%)		27.5	19.1	19.9	22.4
	丸太ヤング係数(Gpa)		11.0	13.7	11.6	12.2
L10	幹曲り率 (%)			28.5	21.1	26.5
	丸太ヤング係数(Gpa)			10.7	12.2	11.2
L02	幹曲り率 (%)				24.6	26.5
	丸太ヤング係数(Gpa)				10.9	10.6
最小 二乗平均	幹曲り率 (%)	27.0	27.7	22.3	22.2	24.8
	丸太ヤング係数(Gpa)	11.8	10.7	11.8	11.8	11.5

表-3c カラマツ27号検定林の幹曲り率および丸太ヤング係数の最小二乗平均値

		花粉親					最小 二乗平均
		L06	L07	L09	L08	L01	
母樹 L04	幹曲り率 (%)	27.8		20.6	28.0	31.4	29.2
	丸太ヤング係数(Gpa)	11.3		11.9	11.1	11.5	11.7
L06	幹曲り率 (%)		41.9	28.6	22.6	31.7	30.2
	丸太ヤング係数(Gpa)		11.0	9.4	10.2	9.9	10.0
L07	幹曲り率 (%)				17.9	37.7	27.8
	丸太ヤング係数(Gpa)				11.0	12.4	11.9
L09	幹曲り率 (%)				38.1	30.8	35.7
	丸太ヤング係数(Gpa)				10.3	10.9	10.8
L08	幹曲り率 (%)					25.3	21.5
	丸太ヤング係数(Gpa)					11.2	11.1
最小 二乗平均	幹曲り率 (%)	26.1	40.1	23.8	24.0	30.6	28.9
	丸太ヤング係数(Gpa)	10.7	12.1	10.8	10.7	11.2	11.1

表-4a グイマツ雑種F₁の遺伝率

遺伝率	遺伝様式	雑種16号		雑種26号		雑種16号・26号	
		胸高直径	樹高	胸高直径	樹高	丸太ヤング係数	幹曲り率
狭義の遺伝率	GCA	0.01	0.17	0.03	0.09	0.17	0.14
	(内訳) (母樹)	0.01	0.06	0.02	0.07	0.16	0.10
	(花粉親)	0	0.11	0.01	0.02	0.01	0.04
広義の遺伝率	GCA+SCA	0.14	0.55	0.03	0.27	0.46	0.29
	(内訳) (SCA)	0.13	0.38	0	0.19	0.29	0.15

GCA: 一般組合せ能力、SCA: 特定組合せ能力

表-4b カラマツの遺伝率

遺伝率	遺伝様式	カラマツ14号				カラマツ27号			
		胸高直径	樹高	丸太ヤング係数	幹曲り率	胸高直径	樹高	丸太ヤング係数	幹曲り率
狭義の遺伝率	GCA	<0.001	<0.001	0.00	0.00	0.00	<0.001	0.53	<0.001
広義の遺伝率	GCA+SCA	<0.001	0.08	0.86	0.00	0.07	1.49	0.53	<0.001
	(内訳) (SCA)	0.00	0.08	0.86	0.00	0.07	1.49	<0.001	0.00

GCA: 一般組合せ能力、SCA: 特定組合せ能力

表-5a ギイマツ雑種F₁の形質間の相関係数

	樹高 (ρ)	丸太ヤング 係数 (ρ)	幹曲り率 (ρ)
胸高直径	0.577 (0.001)	-0.177 (0.374)	0.020 (0.920)
樹高		0.016 (0.377)	-0.176 (0.377)
丸太ヤング係数			-0.247 (0.210)

表-5b カラマツの形質間の相関係数

	樹高 (ρ)	丸太ヤング 係数 (ρ)	幹曲り率 (ρ)
胸高直径	0.324 (0.100)	-0.324 (0.100)	0.347 (0.077)
樹高		-0.106 (0.597)	0.235 (0.239)
丸太ヤング係数			-0.350 (0.074)

考察

本研究では北海道東部に造成した31年、32年生のギイマツ雑種次代検定林とカラマツ次代検定林の成長と材質の家系間変異について評価した。

隣接する雑種16号検定林とカラマツ14号検定林で比較すると、カラマツ検定林で調査林齢が1年高いが、ギイマツ雑種F₁とカラマツの胸高直径、樹高同様の値であった。一方、もうひと組の隣接する雑種26号検定林とカラマツ27号検定林ではカラマツの胸高直径、樹高が大きかった。北海道西部の美唄市と新冠町に造成した検定林の比較では、いずれもギイマツ雑種F₁よりカラマツの成長がよかった (Kita *et al.* 2009)。これらの結果から育種カラマツの成長はギイマツ雑種F₁と同等か、やや優れるといえる。

丸太ヤング係数の平均はギイマツ雑種F₁が13.1GPa、カラマツが11.5と11.1GPaでギイマツ雑種F₁が高かった。また幹曲り率はギイマツ雑種F₁が21.3%、カラマツが24.8%と28.9%でギイマツ雑種F₁が低かった。同様の結果は根井ら (2005, 2006)、大島ら (1994, 1997) にも報告されており、材質面からギイマツ雑種F₁は、カラマツに比べて建築用材に適していると結論づけることができる。カラマツで作られている一般的な構造用集成材はE95-F270であり、必要なヤング係数は7.0~11.0GPaである (根井ら 2006)。ギイマツ雑種F₁では全兄弟家系の平均でみると11.9~14.9GPaであり1~2ランク強度が高い構造用集成材を作ることが可能と考えられる。北海道西部の29年生次代検定林で調べたギイマツ雑種F₁とカラマツの丸太ヤング係数はそれぞれ11.7GPa、9.2GPaであり (根井ら 2005)、本報告のヤング係数は高かった。直径成長とヤング係数の間には相関がなかったこと、間伐強度を高め年輪幅が広がっても材の強度が低下しないこと (安久津ら 2012) から直径成長の違いだけではヤング係数の高低は説明できず、植栽環境の違いがヤング係数に与える影響について今後、検討する余地がある。

成長と材質に有意な相関がなかったことから、成長と材質の選抜は独立してできることが示唆された。すなわち強度の

求められる建築用材では成長を落とすことなく材質の良い家系を、強度を求めない梱包材などの用途に対しては材質を落とすことなく成長重視の家系を選抜でき、目的に応じた材を供給できることを示している。

ギイマツ雑種F₁では雑種26号検定林の胸高直径を除き、成長形質が母樹間、花粉親間ともに有意に異なっていた。一方、胸高直径と樹高を比較すると狭義の遺伝率は胸高直径よりも樹高で高かった。この結果は、片親のいずれかをを選ぶことで成長形質の改良できるが樹高でより高い改良効果が期待できることを示している。同様の結果はギイマツ雑種F₁の別の試験地 (Kita *et al.* 2009) や他の樹種 (*Pinus taeda*: Paul *et al.* 1997, White *et al.* 2007の表6.1) でも報告がある。また立木密度別植栽試験によると樹高より胸高直径で林冠閉鎖後に立木密度の影響を受けることから (山田ら 2009)、樹高は遺伝的な影響を比較的強く受けるが、胸高直径は林齢が上がるにつれ立木密度など環境の影響が強くなることを示唆している。

ギイマツ雑種F₁では丸太のヤング係数と幹曲り率の狭義の遺伝率は母樹由来によるものが高いことから材質面から優良家系を選抜するためには母樹であるギイマツの選抜が有効であることが分かった。若齢時 (14~19年生) における材質形質 (幹曲り、ヤング係数、材の密度) の狭義の遺伝率は0.5以上であった (大島ら 1994, 1995 田村ら 2004, 2005)。一方、本研究による30年生を超えたギイマツ雑種F₁の狭義の遺伝率はヤング係数が0.17、幹曲りは0.14であり、遺伝的な支配は、林齢が高くなると低くなる傾向にあった。しかし、林齢が30年を超えても母樹間でヤング係数と幹曲り率は有意に異なり、優良な母樹を選抜することで、伐期に達した際の材質にも改良効果が認められた。

カラマツの幹曲り率は母樹間、花粉親間ともに違いがなく、狭義の遺伝率および広義の遺伝率は、いずれも0か0.001以下であった。大島ら (1997) は20年生のカラマツで幹曲りの遺伝率を0.33と報告しており、31-32年生の本研究よりも高い遺伝率であった。ギイマツ雑種F₁の幹曲りの遺伝率も、林齢が高くなると低くなっていることから同様の傾向が伺える。福地ら (1985) は曲がった樹幹が肥大成長により、みかけの

回復をすることを示唆しており、胸高直径がより太くなった31-32年生では、幹曲りのみかけの改善がされたことにより、遺伝的な支配が見かけ上弱くなっている可能性もある。

カラマツの胸高直径、樹高、ヤング係数が母樹間で違うか、花粉親間で違うかは検定林で結果が異なっていた。その理由としてカラマツでは調査対象とした検定林によって交配親のクローン組成が大きく異なっていることが考えられ、交配親である精英樹それぞれで母樹としての遺伝特性、花粉親としての遺伝特性を評価する必要があることを示唆している。

カラマツ27号検定林で丸太ヤング率の狭義の遺伝率が高く、複数のクローンがランダムに交配する現在の採種園方式に適した特徴を示していた。一方、カラマツ14号検定林の丸太ヤング係数やカラマツ27号検定林の樹高において、SCAに由来する広義の遺伝率が高かった。またグイマツ雑種F₁でも、カラマツより狭義の遺伝率が高い傾向にあるものの、SCA由来の広義の遺伝率がそれ以上に高いか、同程度であった。SCA由来の広義の遺伝率が高いと特定の親の組合せで子供の値が悪くなる可能性があるため、そのような組合せの種子ができないよう採種園のクローン構成を考慮する必要があることを示している。

以上のことをまとめると、グイマツ雑種F₁の樹高、丸太ヤング係数、幹曲り率、カラマツの丸太ヤング係数で家系選抜の効果が認められた。一方、SCAが高い場合があり、特定の親の組合せで子供の値が悪くならないよう採種園のクローン構成を考慮する必要があると考えられた。

謝 辞

分散分析の解析および分散成分や遺伝率の推定に用いたSASプログラムは、独立行政法人森林総合研究所林木育種センター九州育種場の武津英太郎博士に提供頂くとともにその使用方法についてご指導、ご助言頂いた。感謝いたします。

引用文献

安久津久・松本和茂・藤本高明・大野泰之・滝谷美香・八坂通泰 (2012) カラマツにおける間伐強度の違いが年輪構造や丸太のヤング係数に及ぼす影響. 木材学会誌 58: 249-260

Fujimoto, T., Akutsu, H., Kita, K., Uchiyama, K., Kuromaru, M., Oda, K. (2006a) Age trends of genetic parameters of spiral grain in hybrid larch F1 and implications for efficiency of early selection. *Journal of Wood Science*, 52: 101-106,

Fujimoto, T., Kita, K., Uchiyama, K., Kuromaru, M., Akutsu, H., Oda, K. (2006b) Age trends in the genetic parameters of wood density and the relationship with growth rates in hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) F₁. *Journal of Forest Research*, 11: 157-163,

Fujimoto, T., Akutsu, H., Nei, M., Kita, K., Kuromaru, M., Oda,

K. (2006c) Genetic variation in wood stiffness and strength properties of hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*). *Journal of Forest Research*, 11: 343-349,

福地 稔・水井憲雄・菊沢喜八郎 (1985) カラマツ幹曲りの見かけの回復. *日林論*96.411-412.

北海道立林産試験場研究普及推進会議カラマツワーキンググループ (2005) カラマツ活用ハンドブック. 75pp. 北海道立林産試験場. 旭川

Kita, K., Fujimoto, T., Uchiyama, K., Kuromaru, M., Akutsu, H. (2009) Estimated amount of carbon accumulation of hybrid larch in three 31-year-old progeny test plantations.. *Journal of Wood Science*, 55:425-434

来田和人・市村康裕・藤本高明・内山和子・黒丸 亮 (2011) 建築用材に適したカラマツ類の家系選抜. 北海道の林木育種54(2) .5-8.

森泉 周 (2006) カラマツ材利用の現状と将来. 北海道の林木育種49(1)16-19

根井三貴・安久津久・藤本高明・高見友子(2004)グイマツ雑種F₁の材質とその利用. 北海道の林木育種47(2).5-8.

根井三貴・藤本高明・安久津久・来田和人(2006)グイマツ雑種F₁の幹曲りとヤング係数の家系間差. *日論北支論* 53:12-14

根井三貴・藤本高明・安久津久・来田和人(2005)グイマツ雑種F₁の実大材の強度性能. *日論北支論*54:24-26

大島紹郎・高橋幸男(1991)カラマツ精英樹系統の生長と幹の曲がりにおける育種効果. 北海道の林木育種33(2)10-13.

大島紹郎・錦織正智(1994)グイマツ雑種F₁の幹曲りににおける家系間変異.*日林北支論*42:37-39

大島紹郎・黒丸亮(1995)グイマツ雑種F₁の材質における特性. *日林論*106.297-298

大島紹郎・黒丸 亮・山田浩二(1997)カラマツ精英樹交配家系において推定した幹曲りの遺伝率. *日林論*108.311-312.

Paul A. D., Foster G.S. Caldwell, T., and McRae J. (1997) Trends in genetic and environmental parameters for height, diameter, and Volume in a multilocation clonal study with loblolly pine. *Forest Science* 90: 395-400

田村 明・井城泰一・西岡直樹・佐藤亜樹彦・笹島芳信・黒沼幸樹 (2004) 若齢期におけるグイマツ雑種F₁の幹曲りの家系間変異と遺伝率の推定. 北海道の林木育種47(1)8-11.

田村 明・飯塚 也・井城泰一・西岡直樹・佐藤亜樹彦・笹島芳信・黒沼幸樹 (2005) 若齢期におけるグイマツ雑種F₁の容積密度の家系間変異と遺伝率の推定. 北海道の林木育種48(1).1-4.

White T. L., Adams W.T., and Neale D. B. (2007) *Forest genetics*. 682pp. CABI Publishing. Oxfordshire.

Xiang B. and B. Li (2001) A new mixed analytical method for genetic analysis of diallel data. *Can. J. For. Res* 31 : 2252-2259
 山田健四・八坂通泰・大野泰之・中川昌彦 (2009) 低密度植栽後24年間のグイマツ雑種F₁の成長. *日林北支論* 61: 85-87

Summary

In Hokkaido, northern Japan, more and more artificial stands of Japanese larch (*Larix kaempferi*) have been logged lately, because of their maturation and increasing demand for domestic timber due to the recent decrease of imported logs. Wood properties of Japanese larch have been reported to adapt to construction wood. But usages for construction woods are few in Japanese larch. The purpose in this study is to reveal the variation of growth, modulus of elasticity (MOE) and crooking for logs in about 30-years-old Japanese larch and the hybrid larch (*L. gmelinii* var. *japonica* x *kaempferi*) progeny tests.

In east part of Hokkaido, two hybrid larch progeny test sites and two Japanese larch progeny test sites were establish in 1974 and 1977. These progeny tests are consist of full-sib families. Diameter at breast height (DBH) and tree heights were measured in 31 or 32-years old. Woods in 3.65m length were sampled in 2007, and crooking and modulus of MOE for logs were measured.

Ranges of full-sib family means of DBH and tree height for the hybrid larch were 16.8-25.8cm and 18.3-23.6m, respectively. Those for Japanese larch were 18.0-23.7cm, and 19.7-23.0m, respectively.

Averages (range of full-sib family means) of crooking were 21.3% (10.4-45.0%) for the hybrid larch, and 24.8% (18.3-32.0%) in No.14 site and 28.9% (17.9-41.9%) in No.27 site for Japanese larch. In brief, crooking was smaller in the hybrid larch than Japanese larch.

Average (range of full-sib family means) of MOE were 13.1GPa (11.9-14.9GPa) for the hybrid larch, and 11.5GPa (10.7-13.7GPa) in No.14 site and 11.1GPa(9.4-12.4GPa) in No.27 site for Japanese larch, which shows that wood strengths of the hybrid larch and Japanese larch adapted to construction wood.

Growth traits of the hybrid larch were significantly different between female families and between male families, except for DBH in a progeny test site. Wood properties of the hybrid larch were significantly different between female families. Crooking of Japanese larch were neither different between female families nor between male families. The results of statistical test for differences between families didn't coincide with test sites

There were not significant correlation with growth traits and wood properties, which suggest that it is possible to select each trait, independently. The narrow sense heritabilities were 0.09-

0.53 for tree height, crooking and MOE of the hybrid larch, and MOE of Japanese larch. It showed that family selections were effective to these traits.

Key words: construction wood, crooking, modulus of elasticity for logs, growth, heritability, cross pollination