

# アカエゾマツ精英樹クローンの材質と遺伝的変異

根井 三貴      安久津 久<sup>\*1</sup>      来田 和人<sup>\*2</sup>

## Wood Properties and Genetic Variation in Plus-tree Clones of *Picea glehnii*

Miki NEI      Hisashi AKUTSU      Kazuhito KITA

Studies of ring analysis by X-ray densitometry and spiral grain examination were conducted. Materials were sampled from 31 plus-tree clones of *Picea glehnii* planted in the seed orchard in Kunneppu. Analyses of variance demonstrated that ring width, earlywood width, ring density, earlywood density and latewood density were significantly different among clones. It was thought that genetic improvement would be possible because of the repeatability levels of ring width and latewood density were high. The mean grain angle was not significantly different among clones, but patterns of variation within stem were different among clones. Repeatability of these characteristics had a tendency to increase with increasing ring number. For the selection of a superior clone, it was suitable to use the outside of the stem.

**Key words:** *Picea glehnii*, plus tree clone, density, spiral grain, repeatability  
アカエゾマツ, 精英樹クローン, 密度, 繊維傾斜度, 反復率

訓子府採種園植栽のアカエゾマツ精英樹 31 クローンについて、X 線年輪解析および繊維傾斜度の測定を行った。分散分析の結果、年輪幅、早材幅、平均密度、早材密度、晩材密度でクローン間に有意差が認められた。反復率は年輪幅、晩材密度で高かったことから、育種による改良が可能であると考えられた。平均繊維傾斜度はクローン間に有意差が認められなかったが、放射方向の変動のパターンはクローンによって違いが見られた。これらの形質の反復率は樹皮側で増加する傾向があり、優れたクローンの選抜には樹皮側を用いて検討することが適当と考えられた。

### 1. はじめに

アカエゾマツは、トドマツ、カラマツと並んで北海道の主要な造林樹種の一つとなっており、今後、利用径級に達した木材が産出されることが見込まれる。民有林で用いる造林種苗に関しては、現在北海道においては訓子府町の道有林内にアカエゾマツ採

種園が造成され、精英樹の維持管理と種子生産が行われているが、精英樹の選抜は成長量や樹形など外見上の形質を基準に行われており<sup>1)</sup>、木材を利用する上で重要となる密度、強度などの材質は考慮されていない。材質の優れたアカエゾマツ材を生産するためには、精英樹の材質評価と採種園の整備が求められる。

材質の中でも、密度は強度性能と相関が高く、近年地球温暖化で注目されている炭素貯蔵量にも影響することから<sup>2)</sup>、選抜の重要性が高いと考えられる。また、アカエゾマツは、他の樹種に比べて繊維傾斜度が大きいことが報告されており<sup>3)</sup>、精英樹の繊維傾斜度を把握し、遺伝的改良の可能性を検討する必要がある。本報告では、訓子府採種園から採取したアカエゾマツ精英樹クローンについて、X線年輪解析および繊維傾斜度の測定を行ったので、結果を報告する。

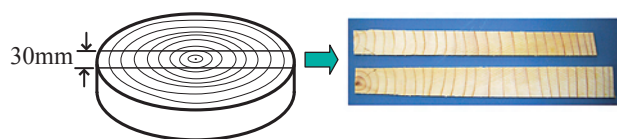
## 2. 供試木

供試木は、北海道網走東部森づくりセンター管内にある訓子府採種園から得た。採種園は、接木クローンにより単木混交方式で造成されており、含まれるアカエゾマツ精英樹クローンの数は54である。このうち、2004年に20ブロック（1972年造成）と22ブロック（1973年造成）で間伐を行い、供試木を採取した。ブロックの区域面積はそれぞれ1.12ha、植栽間隔は4×4m、植栽本数は625本/haである。供試木採取時点での現存本数は、20ブロックが550本/ha、22ブロックが596本/haであった。間伐時の林齢は31～32年生であった。クローン数は31、クローンにつき試験体数は2～4で、試験体数の合計は89本であった。供試木の平均胸高直径は27.3cm、平均樹高は14.9mであった。

## 3. 試験項目と試験方法

### 3.1 X線年輪解析

供試木を伐採した後、地上高0.2～2.2mの部位から素材を採取し、厚さ30mmの樹心を含む柾目板を製材した。この柾目板の末口側から、繊維方向の厚さが2mmの切片を採取し、含水率約12%に調整したものを、X線年輪解析用試料とした（第1図）。測定した形質は、年輪幅、早材幅、晩材幅、年輪内密



第1図 X線年輪解析用試料

Fig. 1. Sample of ring analysis by X-ray densitometry.

度（以下、平均密度）、早材密度、晩材密度である。測定は軟X線デンシトメトリ法<sup>4)</sup>に従った。X線撮影装置は、日本ソフテックス社製のCMB2型を使用し、撮影条件は19kV、2.5mA、露光時間32秒とした。フィルムの濃度測定には、コニカメディカル社製マイクロフォトメータ2111型を用いた。早晩材の区分は、年輪内の密度が0.55g/cm<sup>3</sup>を超えた部分を晩材部とし、各年輪の2方向の平均値を年輪の代表値とした。樹心から数えて1年輪目および最終年輪は、構造が不完全であるため測定対象から除外した。

### 3.2 繊維傾斜度の測定

繊維傾斜度の測定に用いる試料は、3.1の試料と連続して、柾目板の末口側から繊維方向の厚さが30mmの切片を採取した。測定は中川の方法<sup>5)</sup>に従った。すなわち、両木口面に樹心を通る平行な基準線を引き、片側の基準線に沿ってなたで割裂した。反対側の面で基準線に対してずれた距離を年輪ごとに測定し、ずれた距離と厚さ（30mm）との比から繊維傾斜度を求めた。解析の対象は、各年輪2方向の繊維傾斜度を平均した値とした。X線年輪解析と同様に、1年輪目および最終年輪は測定対象から除外した。

### 3.3 統計解析

優れたクローンを選抜するためには、形質の値がクローンによって差があるか、その形質が次世代に遺伝するか二つが重要となる。そこで、各形質のクローン間差と反復率を求めるために分散分析を行った。分散分析は、SAS (Statistical Analysis System) のGLM Procedure<sup>6)</sup>を用い、次の線形モデル<sup>7)</sup>に従って行った。

$$Y_{ij} = \mu + C_i + \varepsilon_{ij}$$

ここで、 $Y_{ij}$ は*i*番目のクローンの*j*番目の個体の測定値、 $\mu$ は全体の平均値、 $C_i$ は*i*番目のクローンの変量効果、 $\varepsilon_{ij}$ はクローン内の誤差である。試料を採取した部位の年輪数は個体によって異なっていたため、年輪解析は樹心側から数えて2～25年輪目を対象とした。分散成分はVARCOMP Procedureで求め、次式により反復率（広義の遺伝率）を算出した。

$$h^2 = \sigma_c^2 / (\sigma_c^2 + \sigma_e^2)$$

ここで、 $h^2$ は反復率（広義の遺伝率）、 $\sigma_c^2$ はクローンの分散成分、 $\sigma_e^2$ は誤差を表す。

## 4. 結果と考察

各形質のクローン平均値の測定結果を第1表に、分散分析表を第2表に示す。

## 4.1 X線年輪解析

## 4.1.1 各形質の関係とクローン間差

供試クローンの全個体の平均値はそれぞれ、年輪幅 4.7mm (変動係数: CV17.2%), 早材幅 4.2mm (CV20.0%), 晩材幅 0.5mm (CV28.8%), 平均密度 0.38g/cm<sup>3</sup> (CV10.3%), 早材密度 0.34g/cm<sup>3</sup> (CV8.9%), 晩材密度 0.66g/cm<sup>3</sup> (CV3.5%) であった。ここで個

体の平均値とは、一個体内の年輪の代表値の平均を指す。分散分析の結果は、晩材幅を除いてクローン間に有意差が認められた。各形質の反復率は 0.13 ~ 0.55 であり、年輪幅の 0.44 や晩材密度の 0.55 が高かったことから、これらの形質の選抜効果は高いと考えられた。

第2図にクローン平均の年輪幅と平均密度の関係を示す。年輪幅が大きいクローンは密度が小さくなる傾向があった (相関係数  $r = -0.593^{**}$ )。これは、針葉樹の一般的な傾向と一致する。

第1表 各形質のクローン平均値

Table 1. Average value of each clones.

クローン名 Name of clone	年輪幅 RW (mm)	早材幅 EW (mm)	晩材幅 LW (mm)	平均密度 RD (g/cm <sup>3</sup> )	早材密度 ED (g/cm <sup>3</sup> )	晩材密度 LD (g/cm <sup>3</sup> )	平均繊維傾斜度 Mean grain angle (%)
阿寒104 (Akan104)	4.2	3.5	0.7	0.43	0.36	0.71	7.4
阿寒106 (Akan106)	3.5	3.0	0.5	0.41	0.36	0.66	6.9
旭川107 (Asahikawa107)	5.6	5.1	0.5	0.32	0.28	0.64	4.7
旭川108 (Asahikawa108)	4.0	3.5	0.5	0.40	0.36	0.67	7.4
雄武3 (Oumu3)	4.4	4.0	0.5	0.39	0.36	0.66	6.1
雄武4 (Oumu4)	4.6	4.1	0.5	0.39	0.36	0.67	4.7
雄武5 (Oumu5)	6.4	5.8	0.6	0.36	0.32	0.66	6.5
雄武112 (Oumu112)	4.8	4.2	0.5	0.39	0.35	0.64	5.8
雄武113 (Oumu113)	5.3	4.7	0.6	0.39	0.34	0.68	6.8
雄武114 (Oumu114)	3.5	3.1	0.4	0.39	0.35	0.65	4.9
置戸104 (Oketo104)	4.2	3.4	0.8	0.42	0.36	0.69	6.5
興部1 (Okoppe1)	4.3	3.8	0.5	0.35	0.31	0.65	4.4
興部2 (Okoppe2)	4.6	4.2	0.4	0.34	0.30	0.64	7.3
興部3 (Okoppe3)	4.8	4.3	0.5	0.38	0.34	0.66	5.9
興部106 (Okoppe106)	4.3	3.9	0.4	0.37	0.33	0.66	4.9
興部112 (Okoppe112)	4.6	4.1	0.5	0.38	0.35	0.63	7.5
北演110 (Hokuen110)	4.4	4.0	0.4	0.36	0.32	0.66	6.9
北見2 (Kitami2)	4.2	3.6	0.6	0.40	0.35	0.66	5.9
北見3 (Kitami3)	5.5	4.9	0.6	0.38	0.34	0.68	6.0
北見4 (Kitami4)	4.5	4.0	0.6	0.39	0.35	0.65	4.1
北見6 (Kitami6)	5.3	4.7	0.6	0.36	0.32	0.66	5.6
王子192 (Ouji192)	5.8	5.4	0.4	0.33	0.30	0.62	6.3
王子193 (Ouji193)	4.8	4.3	0.4	0.38	0.35	0.65	4.8
王子194 (Ouji194)	4.9	4.5	0.4	0.36	0.34	0.63	7.8
士別102 (Shibetsu102)	4.3	3.8	0.5	0.39	0.35	0.64	5.6
弟子屈104 (Teshikaga104)	4.1	3.6	0.5	0.40	0.35	0.67	5.2
東演426 (Touen426)	4.9	4.3	0.7	0.38	0.33	0.67	5.4
中頓別102 (Nakatonbetsu102)	5.0	4.5	0.5	0.37	0.34	0.63	6.1
中頓別103 (Nakatonbetsu103)	4.1	3.6	0.6	0.38	0.34	0.64	6.1
中頓別108 (Nakatonbetsu108)	4.3	3.9	0.4	0.34	0.31	0.64	6.5
美深106 (Bifuka106)	5.3	4.9	0.4	0.32	0.29	0.62	5.5
平均 Average	4.7	4.2	0.5	0.38	0.34	0.66	6.0
最大 Max	6.4	5.8	0.8	0.43	0.36	0.71	7.8
最小 Min.	3.5	3.0	0.4	0.32	0.28	0.62	4.1

RW: Ring width, EW: Earlywood width, LW: Latewood width, RD: Ring density, ED: Earlywood density, LD: Latewood density

第2表 各形質の分散分析

Table 2. Variance of observed values among clones.

形質 Character	自由度 Degree of freedom	平均平方 Mean square	F値 F value	反復率 $h^2$
年輪幅 RW	30	1.2278	3.23**	0.44
早材幅 EW	30	1.2601	2.96**	0.41
晩材幅 LW	30	0.0277	1.40	0.13
平均密度 RD	30	0.0021	1.75*	0.20
早材密度 ED	30	0.0012	1.70*	0.19
晩材密度 LD	30	0.0011	4.57**	0.55
平均繊維傾斜度 Mean grain angle	30	3.8189	1.17	0.09

\*\* および \* は 1%, 5% 水準の統計的有意差を示す

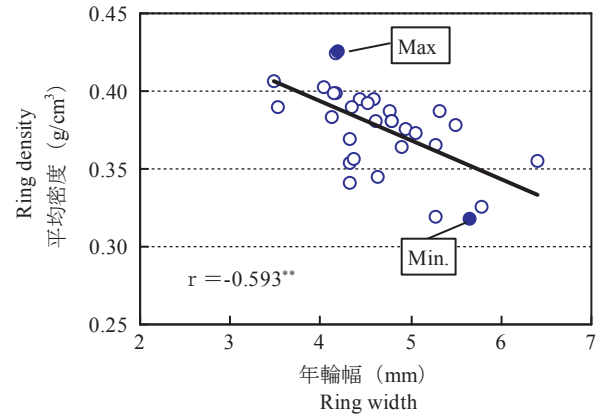
\*\* : Significant at the 1% level \* : Significant at the 5% level

RW, EW, LW, RD, ED, LD: See legend to Table 1

アカエゾマツの既存の報告としては、安久津らが(独)森林総合研究所林木育種センター北海道育種場(以下、北海道育種場)植栽の精英樹18クローンについて材質試験を行っている<sup>3)</sup>。解析した年輪の位置や年輪数は異なるが、それらの平均値は、年輪幅が4.1mm、平均密度が0.42g/cm<sup>3</sup>であり、今回の供試木は、これに比べると平均密度がやや小さかった。訓子府採種園は、疎植で成長量が大いと思われることから、密度の値はその影響を受けて小さくなったと考えられる。

各クローンの平均密度を比較すると、平均密度が大きいクローンは、阿寒104の0.43g/cm<sup>3</sup>、置戸104の0.42g/cm<sup>3</sup>などで、平均密度が小さいクローンは、旭川107の0.32g/cm<sup>3</sup>、美深106の0.32g/cm<sup>3</sup>などであった。

供試個体の各形質間の相関係数を第3表に示した。相関係数が特に大きかったのは、年輪幅と早材幅、平均密度と早材密度であった。他の形質間の関係も、年輪幅と晩材幅の組み合わせを除いて、有意な相関が認められた。千葉ら<sup>8)</sup>は、アカエゾマツの容積密度数を高める要因として、早材部の密度が影響することを明らかにしている。本研究では、平均密度の差が大きかった阿寒104と旭川107の早材密度を比較すると、それぞれ0.36g/cm<sup>3</sup>、0.28g/cm<sup>3</sup>で値に有意差が見られたが、早材密度の反復率は0.19であり、



第2図 クローンごとの年輪幅と平均密度の関係  
Fig. 2. The relationship between ring width and ring density of clones.

\*\* は 1% 水準の統計的有意差を示す

最大値: 阿寒104, 最小値: 旭川107

\*\* : Significant at the 1% level

Max: Akan104, Min.: Asahikawa107

第3表 各形質の相関係数

Table 3. Coefficients of correlation of character.

	RW	EW	LW	RD	ED	LD
RW						
EW	0.984**					
LW	-0.084	-0.260*				
RD	-0.595**	-0.702**	0.705**			
ED	-0.537**	-0.624**	0.580**	0.967**		
LD	-0.240*	-0.350**	0.654**	0.661**	0.550**	

\*\* および \* は 1%, 5% 水準の統計的有意差を示す

RW, EW, LW, RD, ED, LD: 第2表参照

\*\* : Significant at the 1% level \* : Significant at the 5% level

RW, EW, LW, RD, ED, LD: See legend to Table 2

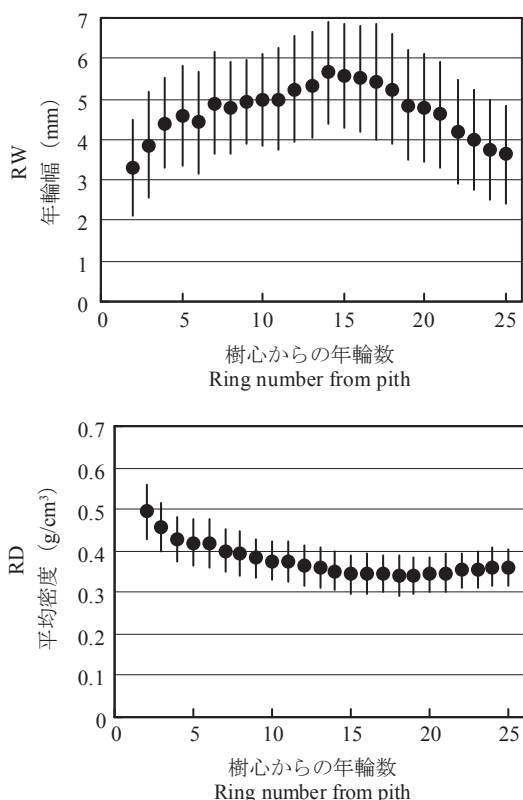
選抜指標とするには小さい値であった。一方、晩材密度を用いて両者を比較すると、それぞれ0.71g/cm<sup>3</sup>、0.64g/cm<sup>3</sup>となり値に有意差が見られ、反復率は0.55と大きかった。本研究の結果では、選抜に用いる形質は晩材密度が有効と考えられた。

#### 4.1.2 形質の放射方向の変動

年輪幅と平均密度の放射方向の変動を第3図に示した。年輪幅は、樹心から樹皮側に向かって増加し、14年輪目で最大値5.7mmを示した後、減少した。平均密度は樹心付近でやや大きく、樹皮側に行くにつれて減少し、外側10年輪は0.35g/cm<sup>3</sup>前後で推移した。アカエゾマツの密度が、樹心付近で大きく、樹皮側で小さいという傾向は、安久津らの報告<sup>3)</sup>と一致していた。

#### 4.1.3 反復率の放射方向の変動

第4図に反復率の放射方向の変動を示す。年輪幅



第3図 年輪幅と平均密度の放射方向の変動

Fig. 3. Horizontal variation of ring width and ring density within stem.

●は平均値、縦棒は標準偏差を示す

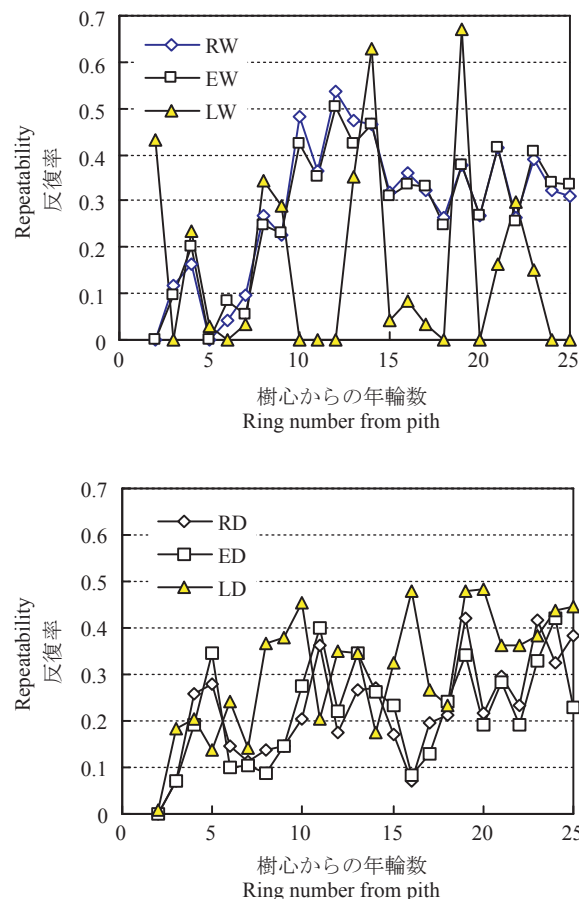
RW, RD: 第2表参照

Symbols and vertical bars denote average and standard deviation.

RW, RD: See legend to Table 2.

と早材幅はほぼ同じ変動を示し、13年輪目にピークがあり、減少した後、0.3～0.4前後で推移した。晩材幅の反復率は、高い値を示す部分もあったが全体的に値は低かった。平均密度と早材密度の反復率は、類似した変動を示しており、樹皮側に行くにつれやや増加する傾向にあった。晩材密度の反復率は、増減の幅が大きい、平均密度などと同様、樹皮側に行くにつれ値が増加する傾向が見られた。

反復率が樹心側で高く、かつ各形質の樹心側の年輪と樹皮側の年輪の値に相関関係が認められる場合、早期選抜の有効性が高いと推測される。本研究では、平均密度の樹心側10年輪までの平均値と、樹皮側10年輪の平均値との相関係数は0.62となり、正の相関関係が認められた。しかし、各形質の反復率はいずれも樹心付近で低かったため、早期選抜の有効性は低いと考えられる。晩材幅を除いた形質は、10年輪目以降は反復率が増加する傾向が認められる



第4図 各形質の反復率の放射方向の変動

Fig. 4. Horizontal variation of repeatability of annual ring components.

RW, EW, LW, RD, ED, LD: 第2表参照

RW, EW, LW, RD, ED, LD: See legend to Table 2.

ため、選抜に用いるには10年輪目以降の部分が望ましい。

## 4.2 繊維傾斜度

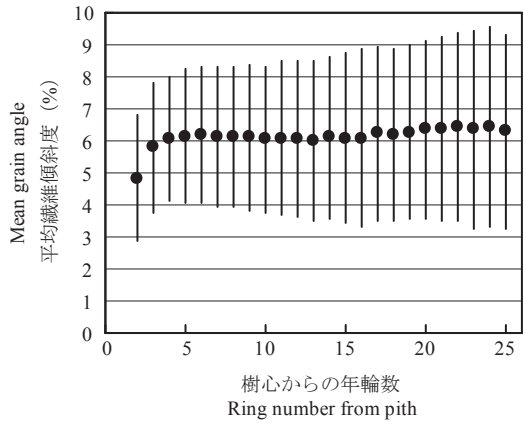
### 4.2.1 形質のクローン間差

繊維傾斜度はねじれの大きさと相関関係があり、値が小さいほど材質が優れていると考えられる。供試クローンの全個体の平均繊維傾斜度は6.0% (CV31.6%)であった。これは、北海道育種場のアカエゾマツ精英樹クローンの値6.4%<sup>3)</sup>と同程度であった。分散分析の結果では、クローン間で有意差は認められなかった。反復率も0.09と低かった(第2表)。

### 4.2.2 平均繊維傾斜度の放射方向の変動

平均繊維傾斜度の放射方向の変動を第5図に示す。全クローンの平均値は、樹心から樹皮側まではほぼ一定の値で推移した。標準偏差は樹皮側に行くに従っ





第5図 平均繊維傾斜度の放射方向の変動  
Fig. 5. Horizontal variation of mean grain angle within stem.

●は平均値、縦棒は標準偏差を示す  
Symbols and vertical bars denote average and standard deviation.

て大きくなり、樹皮側ほど個体のバラツキが大きいことがわかった。このことから、全年輪の平均値はクローン間で差が認められなかったが、樹皮側の年輪の値はクローン間に差がある可能性が考えられる。そこで、15～25年輪目の繊維傾斜度の平均値を比較したところ、クローン間で有意差が認められた。各クローンの平均繊維傾斜度の放射方向の変動を見ると、値が減少傾向を示すもの、横ばいか増減を繰り返すもの、増加傾向を示すもの、と異なるパターンがみられた。その代表として、中頓別103、興部106、王子192の3クローンの平均繊維傾斜度と樹皮側（15～25年輪目）の繊維傾斜度の平均値を第4表に、3クローンの平均繊維傾斜度の放射方向の変動を第6図に示す。興部106は樹皮側（15～25年輪目）の平均値が3.0%となり、樹皮側で値が小さくなった。試験に供した全クローンの6割は樹皮側でも繊維傾斜度の値が減少しなかったものの、樹皮側の年輪の平均値を用いれば、繊維傾斜度が小さくなるクローンを選抜できる可能性があると考えられた。

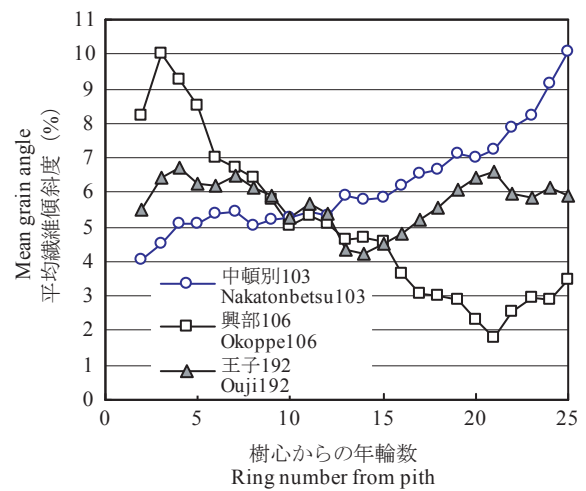
4.2.3 反復率の放射方向の変動  
平均繊維傾斜度の反復率の放射方向の変動を第7図に示す。反復率は全体的に低く、特に10～15年輪目は値がほぼ0まで減少した。しかし、15年輪目以降では反復率は増加する傾向が認められた。反復率が樹心付近で小さいことから、早期の選抜は難しいと考えられる。反復率の増加傾向が続くとすれば、選抜には樹皮側を用いることが望ましい。

4.2.3 反復率の放射方向の変動  
平均繊維傾斜度の反復率の放射方向の変動を第7図に示す。反復率は全体的に低く、特に10～15年輪目は値がほぼ0まで減少した。しかし、15年輪目以降では反復率は増加する傾向が認められた。反復率が樹心付近で小さいことから、早期の選抜は難しいと考えられる。反復率の増加傾向が続くとすれば、選抜には樹皮側を用いることが望ましい。

第4表 3クローンの全年輪および樹皮側（15～25年輪目）の繊維傾斜度の平均値

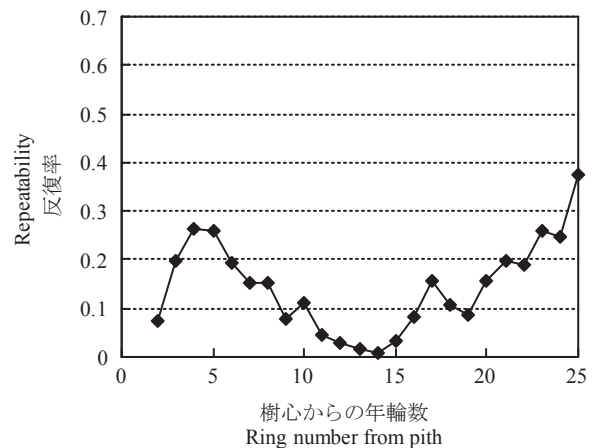
Table 4. Mean grain angles and average of spiral grain angles of rings 15-25 from three clones.

クローン名 Clone	平均繊維傾斜度 (%) Mean grain angle	15-25年輪目の繊維傾斜度の平均値 (%) Average of spiral grain angles of rings 15-25
中頓別103 Nakatonbetsu103	6.2	7.4
興部106 Okoppe106	5.0	3.0
王子192 Ouji192	5.7	5.7



第6図 クローンの平均繊維傾斜度の放射方向の変動例

Fig. 6. Horizontal variation of mean grain angles from three clones.



第7図 平均繊維傾斜度の反復率の放射方向の変動

Fig. 7. Horizontal variation of repeatability of mean grain angle.

## 5. まとめ

訓子府採種園のアカエゾマツ精英樹クローンの X 線年輪解析および繊維傾斜度の測定を行った。結果は次のとおりである。

- (1) 年輪幅、密度などの形質は、晩材幅を除いてクローン間で有意差が認められた。反復率は年輪幅、晩材密度で高い値が得られた。平均密度が大きいクローンは阿寒 104, 置戸 104 などで、小さいクローンは旭川 107, 美深 106 などであった。
- (2) 平均繊維傾斜度は、クローン間で有意差が認められなかったが、クローン平均の年輪ごとの変動には複数のパターンが見られた。
- (3) 反復率は樹心側で小さく、早期選抜は難しいと考えられた。

## 6. おわりに

本研究では、アカエゾマツ精英樹クローンの密度および繊維傾斜度と、それらの遺伝的改良の可能性を検討した。

採種園の改良方法としては、密度が小さいクローンの除去や、優良クローンの新規導入が考えられる。今回の結果を、採種園の管理・造成計画に反映し、材質面からの採種園の改良のために寄与したい。加えて、北海道育種場で作成している精英樹クローンの特性表<sup>9)</sup>などにに基づき、ヤング係数や容積密度が優れた推奨品種を採種園に新たに導入することも、採種園の体質改善のために検討する必要がある。

## 文 献

- 1) 大庭喜八郎, 勝田 柁: “現代の林学 5 林木育種学”, 1991.
- 2) 北海道立林業試験場, 北海道立林産試験場: “平成 15 ~ 17 年度重点領域特別研究報告書 二酸化炭素固定能の高いカラマツ類の品種開発”, 2006.
- 3) 安久津久, 飯塚和也: 日本林学会北海道支部論文集 45 号, 31-34 (1997).
- 4) 野堀嘉裕: 日本林学会誌 **76**, 89-94 (1994).
- 5) 中川伸策: 林業試験場報告 No.248, 97-120 (1972).
- 6) SAS Institute Inc.: "SAS/STAT User's Guide. Version6, 4th Edition, vol.2", Cary, NC., 1990.
- 7) Falconer, D.S.: "Introduction to Quantitative Genetics", Longman Group UK Ltd., London, 1989.
- 8) 千葉茂, 野堀嘉裕, 永田義明: 北海道の林木育種 **34** (2), 1-3 (1991).
- 9) 林木育種センター北海道育種場: “北海道育種基本区アカエゾマツ精英樹特性表”, 2004.

— 利用部 材質科 —

— \*1: 利用部 主任研究員 —

— \*2: 北海道立林業試験場 —

(原稿受理: 07.12.19)