－研究（Original Article）－

# トドマツ精英樹の材質と遺伝的変異（第１報）

## －年輪と強度による接木クローンの選抜－

安久津　久　　藤本　高明[*1]　　来田　和人[*2]　　黒丸　亮[*2]

# Wood Properties and Genetic Variation in Plus-Trees of Todomatsu (*Abies sachalinensis*) (I)

## - Selection of the annual rings and of strength in grafted clones -

Hisashi Akutsu　　Takaaki Fujimoto　　Kazuhito Kita　　Makoto Kuromaru

For the purpose of improvement of wood properties, ring structure determined by X-ray densitometry and the modulus of elasticity (MOE), bending strength (MOR) in the bending test of small clear specimens were examined. The used specimens were 249 grafted plus-trees of Todomatsu (*Abies sachalinensis* ) in 88 clones from the seed orchard in Niikappu. These specimens were 32 to 41-year old clones. The average ring width (RW), ring density (RD), MOR and MOE were 3.27 mm, 0.397 g/cm$^3$, 61.9 MPa and 7.46 GPa, respectively. Analyses of variance of these properties were significant at the 0.1% level among clones. The values of repeatability, heritability as a broad sense, were 0.36 for RW, 0.46 for RD, 0.64 for MOR, and 0.63 for MOE, respectively. It was thought that repeatability of RD, MOR and MOE were high so genetic improvement of these characteristics will be possible.

For the selection of improvement of breeding, the values of the criteria were established by an average RD of 1-25 annual rings and by average MOR and MOE except for specimens, which were nearest to the pith. These values of the criteria were 0.380 g/cm$^3$ for RD, 60.8 MPa for MOR, and 7.56 GPa for MOE. 22 clones which had 2 or 3 factors under the values of the criteria were selected. These clones are considered to be exclusion trees for genetic improvement in the seed orchard.

*Key words*: Todomatsu, plus tree clone, broad sense heritability, density, MOE
トドマツ，精英樹クローン，広義の遺伝率，密度，MOE

材質の改良のためにX線デンシトメトリや無欠点小試験体の曲げ試験を実施した。新冠採種園より採取した林齢32～41年生のトドマツ精英樹の接木クローン88クローンを供試した。総個体数は249であった。年輪幅（RW），年輪密度（RD），曲げ強さ（MOR），曲げヤング係数（MOE）の平均値はそれぞれ3.27mm, 0.397g/cm$^3$, 61.9 MPa , 7.46GPaであった。これらの形質は分散分析から0.1%水準でクローン間に有意差が認められた。広義の遺伝率である反復率はRW, RD, MOR, MOEでそれぞれ0.36, 0.46, 0.64, 0.68であった。RDやMOE,MORの反復率の推定値は比較的高く，育種による改良効果が高いと考える。

1年輪から25年輪の年輪密度の平均値と，樹心に最も近い試料を除いたMORとMOE値の平均値を用いて育種による改良の選抜基準値を設けた。それらの値はRD，MOR，MOEでそれぞれ0.380 g/cm$^3$，60.8 MPa，7.56GPaで，2または3形質で基準値未満の22クローンを選抜した。これらのクローンは採種園の遺伝的改良のための排除木と考えられる。

## 1. はじめに

北海道における林木育種は主に集団選抜育種法によって進められている。この考え方は「形質の優れた親からは優れた形質の子供が得られる確率が高い」とした仮説に基づいている。これに従って，国や北海道では，外見上優れた多くの精英樹を選抜し，その精英樹をクローン化して，多数の精英樹で構成した採種園を造成し，この採種園産種苗（育種種苗）の普及を推進している。これまでの次代検定林での調査から，育種種苗は一般事業用苗に比べ成長や諸被害抵抗性の点で優れていることが明らかになっている。また，トドマツは産地間変異が大きいため[1)]，北海道では，道西南，函館・日高，道央，道東，根釧の五つの需給区分[2)]（**第1図**）を設け，これに対応できる採種園を設けている。

しかし，トドマツの材質については，人工林，天然林を問わず，低密度材の出現による強度低下[3-5)]や水くい材の存在による乾燥への影響[6,7)]など，利用上不都合な点が指摘されている。また，精英樹の材質に関しても外見上からの選抜は困難であり，明らかにはなっていないのが現状である。本研究では，このような背景をふまえ，トドマツ育種種苗の材質の向上を図ることを目的とし，トドマツ精英樹クローンの材質の遺伝的変異の検討を行った。なお，本研究の一部は第52回日本木材学会大会（岐阜市）[8)]および第115回日本森林学会（東京都）[9)]で発表した。

**第1図　新冠採種園（○）とトドマツの需給区分**
Fig.1. Location of the seed orchard (○) and 5 prefectural departments by supply and demand for Todomatsu seeds in Hokkaido.

## 2. 供試木の採取

供試木は日高森づくりセンター管内にある新冠採種園（新冠町字明和192番地）の172林班の間伐木から得た。新冠採種園のトドマツの採種園は接木クローンを用い25型の単木混交方式で1962～1967年に造成された。トドマツ採種園の総面積は約60haで，前述の五つの需給区分に適応できるように36のブロックに細かく区分されている。植栽本数は735～2091本/haでブロックごとに異なっている。間伐は1999年～2004年（林齢32～41年生時）の各年の秋に22のブロックで実施された。これら22ブロックの間伐前の現存本数は145～484本/haであった。試料採取はクローンごとに平均的な胸高直径のものを1クローン当たり2～3個体選び，材長50 cm（地上高1.2～1.7m）の小丸太を得た。なお，試料採取時に胸高直径と樹高を測定した。

供試木の概要を産地ごとに分け**第1表**に示す。精英樹のクローン数は88で，総数は251個体であった。産地ごとの精英樹クローン数と個体数は，道西南17と47，函館・日高17と50，道央25と73，道東22と58，根釧7と21であった。供試クローンを天然林（クローン番号が百番代）と人工林に分ければ，天然林が32クローンで人工林は56クローンであった。

## 3. 試験方法

試験項目は軟X線デンシトメトリ法[10)]による年輪解析とJISの曲げ強度試験（無欠点小試験体での試験）とした。試料は地上高1.2～1.7 m部位の短材から，樹心を含む厚さ30 mmの柾目板を相対する2方

**第 1 表　供試クローンの概要**
Table 1. Description of tested clones.

| 産地<br>Provenance | クローン名（平均胸高直径(cm)，平均樹高(m)）<br>Name of Clone (Avg. DBH, Avg. tree height) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 道西南<br>Douseinan | 岩見沢1 (21.9,14.4) | 岩見沢2 (23.3,13.4) | 岩見沢101 (23.5,14.9) | 岩見沢102 (22.8,15.2) | 岩見沢103 (33.4,18.7) |
| | 岩見沢104 (18.9,12.9) | 岩見沢105 (29.4,15.1) | 岩見沢106 (21.4,12.9) | 岩見沢107 (17.1,10.7) | 苫小牧103 (20.5,13.4) |
| | 苫小牧104 (24.8,14.3) | 苫小牧105 (23.5,14.4) | 苫小牧106 (21.1,14.9) | 苫小牧109 (21.5,13.3) | 留萌4 (23.4,14.3) |
| | 倶知安１ (29.2,16.3) | 倶知安101 (30.0,13.8) | | | |
| 函館・日高<br>Hakodate-Hidaka | 浦河1 (25.8,15.7) | 浦河4 (19.2,11.3) | 浦河5 (17.5,10) | 浦河6 (22.1,13.3) | 浦河7 (22.8,13.6) |
| | 浦河8 (21.1,13.4) | 浦河9 (18.0,10.0) | 浦河101 (24.5,12.0) | 浦河102 (19.5,12.1) | 浦河103 (23.8,14.3) |
| | 浦河104 (21.7,12.3) | 函館1 (25.1,13.9) | 函館2 (28.5,13.6) | 函館3 (25.2,15.1) | 函館4 (24.4,13.7) |
| | 函館5 (24.4,13.2) | 函館6 (28.3,16.6) | | | |
| 道央<br>Douou | 旭川 2 (24.3,13.3) | 旭川6 (14.8,8.7) | 旭川103 (20.8,13.4) | 名寄1 (25.4,13.1) | 名寄2 (26.3,13.9) |
| | 名寄5 (26.6,13.4) | 名寄7 (25.8,13.5) | 名寄9 (21.9,13.5) | 名寄10 (26.3,12.2) | 名寄11 (28.4,14.3) |
| | 美深1 (32.9,15.6) | 美深5 (25.0,12.6) | 美深8 (27.7,13.5) | 美深13 (31.7,13.8) | 雄武6 (28.0,15.0) |
| | 雄武101 (31.5,15.7) | 雄武102 (33.0,15.4) | 雄武103 (29.0,13.6) | 雄武104 (31.3,15.7) | 興部1 (19.1,11.1) |
| | 興部2 (35.6,16.1) | 興部3 (23.0,13.3) | 興部4 (22.3,16.0) | 興部101 (15.9,10.3) | 興部103 (24.9,12.8) |
| 道東<br>Doutou | 池田3 (27.0,14.2) | 池田5 (23.4,13.0) | 池田6 (27.6,15.2) | 池田7 (37.6,17.5) | 池田9 (36.9,16.9) |
| | 池田10 (19.5,11.3) | 池田12 (20.3,13.2) | 池田16 (31.2,15.4) | 池田22 (21.4,12.3) | 池田25 (26.8,14.7) |
| | 池田26 (25.7,14.0) | 池田30 (31.1,16.0) | 池田32 (27.0,14.1) | 池田34 (28.2,14.7) | 池田39 (23.8,14.0) |
| | 池田41 (36.3,16.7) | 池田102 (27.5,15.1) | 十勝3 (20.9,11.7) | 十勝8 (23.0,13.9) | 十勝9 (24.4,13.8) |
| | 北見3 (27.4,15.6) | 浦幌103 (23.0,14.0) | | | |
| 根釧<br>Konsen | 厚岸1 (33.2,15.0) | 厚岸111 (23.1,11.8) | 厚岸112 (29.2,14.0) | 厚岸113 (19.9,12.2) | 厚岸115 (18.9,12.5) |
| | 厚岸121 (34.5,13.6) | 厚岸125 (22.0,13.5) | | | |

岩見沢：Iwamizawa，苫小牧：Tomakomai，留萌：Rumoi，倶知安：Kutchan，浦河：Urakawa，函館：Hakodate，旭川：Asahikawa，名寄：Nayoro，美深：Bifuka，雄武：Oumu，興部：Okoppe，池田：Ikeda，十勝：Tokachi，浦幌：Urahoro，厚岸：Akkeshi

向で採取し，乾燥後に年輪解析用と曲げ試験用の試料を得た。

年輪解析の試料は厚さ（繊維方向）2 mm とした。X 線発生装置はソフテックス社製CMB-2 型を用い，撮影条件を19 kV，2.5 mA，露光時間を32秒とした。密度測定用にはコニカメディカル社製ミクロフォトメータ2111型を用い，スリット10×300 μm，送り1 mm/秒で測定した。年輪解析プログラム[10] を使用し，早晩材の境界を0.55 g/cm$^3$とした。各年輪の2方向の平均値を年輪の代表値とした。試験時の含水率は約 12 %であった。供試木の解析には 1 ～ 25 年輪の値を用いた。

曲げ試験の試料の木取りは，樹心から半径方向に連続して2方向で採取し，断面20×20 mm，材長320 mm の試験体とし，JIS Z 2101 に従って試験した。この試験で，曲げ強さ（以下 MOR），曲げヤング係数（以下 MOE），密度，含水率を得た。なお，1 本目の試料（以下試料No.1）を樹心からの距離3 cm，2本目の試料（以下試料 No.2）を 6 cm とし，以降の試料は 3 cm ずつ加算し，同番号の数値を採取した2方向で平均した。最大の試料 No. は 6 であった。試験体数は 1 クローンあたり 12 ～ 38 で，試験時の含水率は 13 ～ 15%であった。測定試料数はともに 88 クローン 249 個体であった。

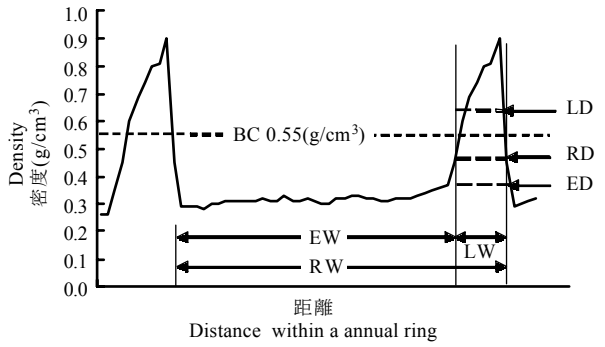
## 4. 統計解析

遺伝的変異の検討は，クローンおよび産地内クローンを要因とする分散分析を行い，分散成分を求めた。分散分析にはSAS（Statistical Analysis System）の GLM Procedure を用い，VAR COMP Procedure により分散成分を求めた。産地は需給区分の道西南，函館・日高，道央，道東，根釧の五つである。

解析した形質は成長形質である樹高と胸高直径，年輪の構成因子6形質，およびJISの曲げ試験の2形質である。解析には樹高と胸高直径は実測値を用い，年輪解析では構成因子（**第 2 図**参照）である年輪幅（RW），早材幅（EW），晩材幅（LW），年輪密度（RD），早材密度（ED），晩材密度（LD）の 1 ～ 25 年輪の各年輪と 25 の年輪の平均値を用いた。JIS の曲げ試験の解析には，MOR と MOE の No.1 ～ No.3 の各試料と平均値を用いた。分散成分から次式により反復率（広義の遺伝率）を算出した。

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

$h^2$：反復率（広義の遺伝率），$\sigma_c^2$：クローンの分散成分，$\sigma_e^2$：誤差




**第 2 図　トドマツの年輪波形と年輪構成因子**
Fig. 2. Diagram of typical density curve within one annual ring and its components in Todomatsu.
凡例）RW：年輪幅，EW：早材幅，LW：晩材幅，RD：年輪密度，ED：早材密度，LD：晩材密度，BC：早晩材の境界
Legend) RW: Ring width (mm), EW: Earlywood width (mm), LW: Latewood width (mm), RD: Ring density (g/cm$^3$), ED: Earlywood density (g/cm$^3$), LD: Latewood density (g/cm$^3$), BC: Boundary criterion

## 5. 結果と考察

### 5.1 統計解析

クローン間での分散分析，反復率，材質試験結果の値を**第 2 表**に示す。表は，産地の違いが成長や材質に影響があるのかを検討するため，産地および産地内クローンを要因とする分散分析を行いその結果を掲載した。

成長形質である胸高直径と樹高の範囲（最小値～最大値）はそれぞれ 14.8 ～ 37.6 cm，8.7 ～ 18.7 m で，分散分析の結果，両形質でクローン間に有意差（P<0.001）が認められたが，産地による差は認められなかった。反復率は0.50と0.38で，胸高直径が樹高よりも大きかった。

年輪構成因子は 25 年輪までの総平均値を用いて解析した。いずれの形質もクローン間に有意差（P<0.001）が認められた。反復率は 0.27 ～ 0.48 であり，幅よりも密度で大きく，晩材よりも早材の反復率が大きかった。すべての形質において産地による差は認められなかった。

曲げ試験は MOR も MOE もクローン間に有意差（P<0.001）が認められた。反復率は 0.64 と 0.68 で，高い値を示した。MOE で産地による有意差（P<0.05）が認められた。

### 5.2 年輪解析

#### 5.2.1 樹幹内の変異

供試木全体の年輪幅と密度を把握するため，全個体の平均値を用いた年輪ごとの変動を**第 3 図**に示した。図は 25 年輪までの全個体の平均値と標準偏差を示している。1 年輪目は不完全な年輪であることから，その年輪を除き各形質の変動を検討した。年輪幅は2.5～4.7 mmで標準偏差は0.84～1.39 mmの範囲であった。年輪幅は 9 年輪目で最小値 2.5 mm となり，以降増加して 15 年輪で 3 mm，21 年輪で 4 mm 以上であった。早材幅も年輪幅と同様の変動を示した。晩材幅は 0.23 ～ 0.59 mm で標準偏差は 0.12 ～ 0.33 mm の範囲であった。晩材幅は加齢に伴い，22 年輪まで増加している。標準偏差も同様に増加しているが，変動係数では年輪ごとに大きな差はなかった。

年輪密度は 0.364 ～ 0.420 g/cm$^3$ で標準偏差は 0.05 ～ 0.08 g/cm$^3$ の範囲であった。年輪密度は，3 年輪目が最小値 0.364 g/cm$^3$ で，以降増加して 11 年輪で最大値 0.420 g/cm$^3$ となり，以降漸減している。早材密度も，年輪密度と類似の推移を示し，3 年輪目で最小値 0.340 g/cm$^3$，11 年輪で最大値 0.363 g/cm$^3$ となり，以降漸減している。晩材密度は 0.571 ～ 0.657 g/cm$^3$ で標準偏差は 0.04 ～ 0.06 g/cm$^3$ の範囲であった。晩材密度は加齢に伴い，14 年輪まで増加傾向を示し，以降横ばいであった。

#### 5.2.2 形質間の相関関係

用いた試料の特徴は，トドマツの次代検定林や一般造林木とは異なり，成長初期の年輪幅が小さく，外側で増加するもので，低密度で管理する採種園の成長特性として捕らえる必要がある。内側の年輪密度の変動は晩材幅と晩材密度の増加に伴うものであり，外側での年輪密度の減少は早材幅の増加に伴うものである。晩材幅や晩材密度の増加は，初期成長の大きい試料でも確認されている[11]ことから，トドマツの一般的な傾向と考えてもよい。

すべての供試個体における各形質間の相関係数を**第 3 表**に示した。相関係数が大きいものは年輪幅と早材幅，年輪密度と早材密度であった。相関係数が小さい形質の組み合わせは晩材幅と早材幅，晩材密度と年輪幅であり，この組み合わせのみ有意な相関が認められなかった。これらのことから，年輪幅や年輪密度は早材幅や早材密度に大きく関連していること，年輪幅と晩材密度，早材幅と晩材幅は独立した形質であることが推察される。

早期選抜の可能性を検討するため，年輪を樹心に

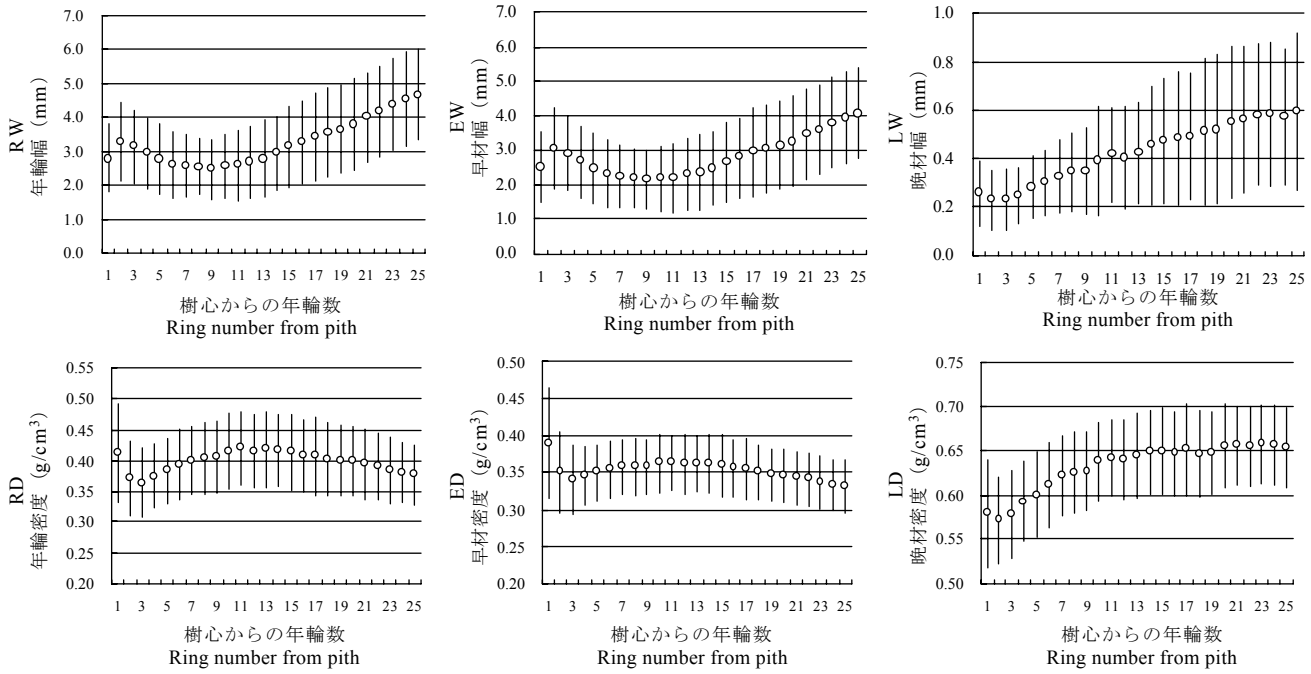
## 第 2 表　分散分析，材質試験，反復率の結果

Table 2. Results of some properties, analyses of variance observed values and repeatabilities among clones.

| 形質 Character | | 要因 Factors | 自由度 DF | 平方和 Sum of squares | 平均平方 Mean square | 分散比 F Value | 反復率 $h^2$ | 平均 Avg. | 最大 Max | 最小 Min |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 成長 Growth | 胸高直径 DBH | 産地 | 4 | 540.282 | 135.070 | 2.08ns | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 5401.583 | 65.079 | 3.68*** | 0.50 | 25.2 | 37.6 | 14.8 |
| | | 誤差 | | 2879.657 | 17.667 | | | | | |
| | 樹高 H | 産地 | 4 | 63.835 | 15.959 | 1.99ns | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 664.535 | 8.006 | 2.60*** | 0.38 | 13.8 | 18.7 | 8.7 |
| | | 誤差 | | 498.953 | 3.080 | | | | | |
| 年輪構成因子 Annual ring components | 年輪幅 RW | 産地 | 4 | 3.894 | 0.973 | 0.94ns | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 85.608 | 1.031 | 2.64*** | 0.36 | 3.27 | 5.45 | 1.72 |
| | | 誤差 | | 62.995 | 0.391 | | | | | |
| | 早材幅 EW | 産地 | 4 | 4.6907 | 1.1727 | 1.14ns | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 85.6729 | 1.0322 | 2.91*** | 0.41 | 2.85 | 5.12 | 1.36 |
| | | 誤差 | | 57.1981 | 0.3553 | | | | | |
| | 晩材幅 LW | 産地 | 4 | 0.0718 | 0.0180 | 0.66ns | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 2.2604 | 0.0272 | 2.11*** | 0.27 | 0.420 | 0.704 | 0.232 |
| | | 誤差 | | 2.0742 | 0.0129 | | | | | |
| | 年輪密度 RD | 産地 | 4 | 0.0118 | 0.0030 | 0.86ns | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 0.2834 | 0.0034 | 3.40*** | 0.46 | 0.397 | 0.487 | 0.332 |
| | | 誤差 | | 0.1615 | 0.0010 | | | | | |
| | 早材密度 ED | 産地 | 4 | 0.0043 | 0.0011 | 0.63ns | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 0.1424 | 0.0017 | 3.71*** | 0.48 | 0.352 | 0.420 | 0.303 |
| | | 誤差 | | 0.0743 | 0.0005 | | | | | |
| | 晩材密度 LD | 産地 | 4 | 0.0099 | 0.0025 | 1.58ns | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 0.1303 | 0.0016 | 2.91*** | 0.41 | 0.631 | 0.704 | 0.574 |
| | | 誤差 | | 0.0869 | 0.0005 | | | | | |
| 曲げ試験 Bending test in small clear specimens | 曲げ強さ MOR | 産地 | 4 | 490.106 | 122.527 | 1.36ns | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 7456.665 | 89.839 | 5.84*** | 0.64 | 61.9 | 76.2 | 45.9 |
| | | 誤差 | | 2492.407 | 15.385 | | | | | |
| | 曲げヤング係数 MOE | 産地 | 4 | 18.717 | 4.679 | 2.6* | | | | |
| | | 産地内クローン | 83 | 149.247 | 1.798 | 6.38*** | 0.68 | 7.46 | 9.47 | 5.24 |
| | | 誤差 | | 45.670 | 0.282 | | | | | |

凡例）***：危険率0.1%水準で有意，*：危険率5%水準で有意，ns：有意でない

Legend) ***: Significant at the 0.1% level, *: Significant at the 5% level, ns: Not significant, DF: Degree of freedom, $h^2$: Repeatability, Avg., Max., and Min: Average, Maximam and Minimum values of sample clones. DBH: Diameter at breast height (cm), H: Tree height (m), RW, LW, EW, RD, ED, LD: See legend to Fig. 2. MOR: Bending strength in small clear specimens (MPa), MOE: Modulus of elasticity in small clear specimens (GPa).




## 第 3 図　年輪構成因子の樹幹内変動

Fig. 3. Variation of ring components by X-ray densitometry within stem.

凡例）○は平均値，縦棒は標準偏差を示す。

Legend) Symbols and vertical bars denote average and standard deviation. RW, LW, EW, RD, ED, LD: See legend to Fig. 2.

第 3 表　年輪構成因子の相関係数
Table 3. Coefficients of correlation of annual ring components.

| | RW | EW | LW | RD | ED | LD |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RW | | | | | | |
| EW | 0.984*** | | | | | |
| LW | 0.181*** | 0.008ns | | | | |
| RD | -0.510*** | -0.630*** | 0.626*** | | | |
| ED | -0.505*** | -0.599*** | 0.496*** | 0.955*** | | |
| LD | -0.041ns | -0.173*** | 0.750*** | 0.676*** | 0.552*** | |

n=249

凡例）n：供試木数，***：危険率 0.1% 水準で有意，ns：有意でない
Legend) RW, LW, EW, RD, ED, LD: See legend to Fig. 2.
n: Number of individual trees, ***: Significant at the 0.1% level, ns: Not significant

第 4 表　年輪構成因子のコアーウッドとアウターウッドの相関係数
Table 4. Coefficients of correlation Corewood-Outerwood of annual ring components.

| | | |
|---|---|---|
| RW | Core-Outer | 0.477*** |
| EW | Core-Outer | 0.472*** |
| LW | Core-Outer | 0.582*** |
| RD | Core-Outer | 0.672*** |
| ED | Core-Outer | 0.726*** |
| LD | Core-Outer | 0.668*** |

n=249

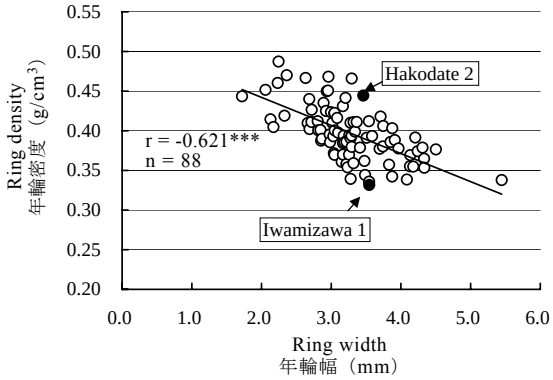
凡例）n：供試木数，***：危険率 0.1% 水準で有意
注）内側は 1-10 年輪，外側は 11-25 年輪を示す。
Legend) n: Number of individual trees, ***: Significant at the 0.1% level, RW, LW, EW, RD, ED, LD: See legend to Fig. 2.
Note) Corewood and outerwood mean average of 1-10 annual rings and 11-25 annual rings, respectively.

近い内側10年輪まで（コアーウッド）と11～25年輪（アウターウッド）に便宜的に区分し[12]，相関係数を求めた。その結果を**第 4 表**に示した。幅の形質は0.472～0.582，密度の形質が0.672～0.726であり，密度での早期選抜の可能性が高いことが分かった。

5.2.3　年輪解析結果での選抜

年輪解析で優良トドマツを選抜する場合，直接関与する形質は年輪密度である。これまで，密度での選抜は容積密度数で実施した結果が多い。宮島[4]は，材のめり込みや釘の保持力から，トドマツの最低基準値を容積密度数で300 kg/m$^3$以上としている。この基準値は容積密度数と密度との直線回帰式での検討や収縮率を用いた密度に換算すると気乾密度で0.371 g/cm$^3$に相当する。ここではこの値より若干大きい0.380 g/cm$^3$をひとつの基準[8]として検討した。クローン別の年輪密度の総平均は0.397 g/cm$^3$であり，最小値は岩見沢1の0.332 g/cm$^3$で，最大値は興部1の0.487 g/cm$^3$である。供試した88クローンの内，基準値以上のものは，全クローンの68.2%に相当する60クローンであった。基準値未満のクローン数は28で，産地ごとの内訳は，道西南5，函館･日高2，道央10，道東8，根釧3で，道央，道東，根釧の3産地の比率が高かった。また，天然林，人工林別では，天然林8，人工林20であり，出現の比率に大きな差はなかった。

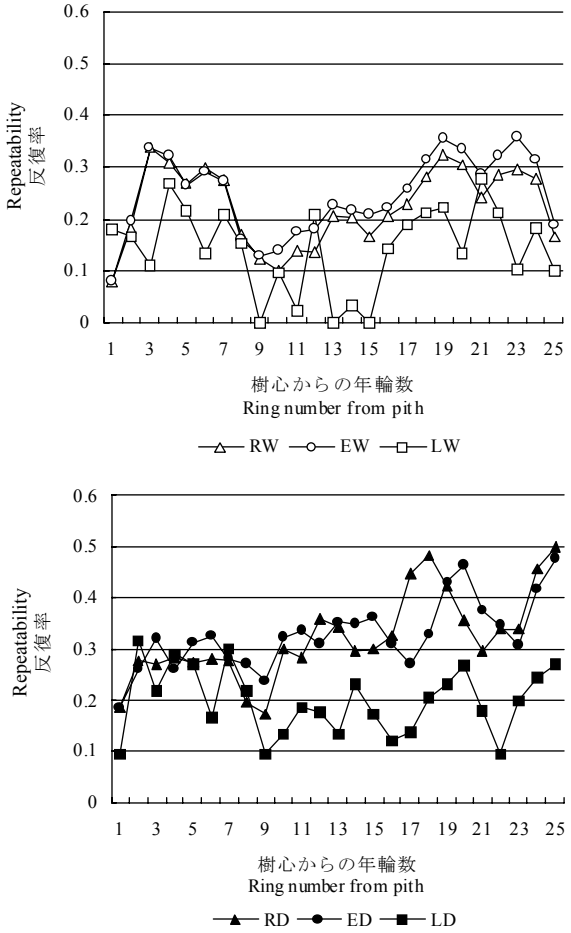
クローンごとに平均した年輪幅と年輪密度の関係を**第4図**に示した。年輪幅の大きいクローンの年輪密度は減少する傾向にある。しかし，図中に示した岩見沢1と函館2のようにほぼ同一な年輪幅にもかかわらず年輪密度が前者で0.332 g/cm$^3$，後者で0.444 g/cm$^3$と大きく異なるクローンもあった。両者で年輪密度が大きく異なる要因は早材密度と晩材幅で，それらの差は0.066 g/cm$^3$と0.47 mmであり，晩材率も岩見沢1は6.5 %で函館2が20.3 %であった。これは，クローンの特性を良く現わしている。




第 4 図　クローンごとの年輪幅と年輪密度の関係
Fig. 4. The relationship between ring width and ring density of clones.
凡例) n: クローン数
注）岩見沢1と函館2は年輪幅が同じで密度が大きく異なる
Legend) n: Number of individual clones, ***: Significant at the 0.1% level
Note) Iwamizawa 1 and Hakodate 2 have the same values of ring width but have different ring densities.

5.2.4　年輪解析での遺伝率

次に広義の遺伝率である反復率の検討を行った。第2表から25年輪までの平均値を用いた反復率は分散分析結果で述べたように，0.27～0.48であった。この値は平均値であり，細かい年輪での変動は読み取れない。年輪解析から得られた6形質の樹心からの年輪数に伴う反復率の変動を**第 5 図**に示した。年輪幅と早材幅の反復率は連動しており，特に樹心に近い年輪幅の小さい部位で顕著である。8～12年輪




**第 5 図　年輪構成因子の反復率の樹幹内変動**
Fig. 5. Variation of repeatability of annual ring components within stem.
Legend) RW, LW, EW, RD, ED, LD: See legend to Fig. 2.

では0.20以下で小さい。反復率の最大年は年輪幅が3年輪の0.34で，早材幅が19と23年輪の0.36であった。晩材幅の反復率は年輪ごとの変動が大きく，12年輪と21年輪を除き年輪幅，早材幅よりも値が小さかった。最大年は21年輪の0.28であった。年輪密度と早材密度の反復率は類似の変動を示し，外側で増加する傾向があった。最大値はともに25年輪で，0.50と0.48であった。晩材密度の反復率は0.09～0.32とRDやEDの値に比べ低い値で推移した。トドマツで各年輪の反復率を推定した報告はないので，藤沢が検討したスギ精英樹クローンでの報告[13]と比較すると，年輪密度，早材密度は他の形質より反復率が比較的高いこと，年輪幅と早材幅は樹心に近い年輪でピークを持つこと，晩材幅と晩材密度の反復率は低いことは本試験での結果と一致している。しかし，本試験の年輪密度と早材密度の反復率の値は藤沢の示した値より高かった。

トドマツ精英樹クローンを用いた材質の反復率は門松[14]が22年生，工藤[15]が20年生前後の試料で検討している。ともに浮力法による容積密度数から検討した値であるが，門松の結果では，年輪幅の反復率は0.36で，容積密度数が0.46としている。工藤の結果では，年輪幅が0.29で，容積密度数が0.39としている。本試験の反復率は，年輪幅が0.36で，年輪密度が0.46であり，ほぼ一致した値を示した。

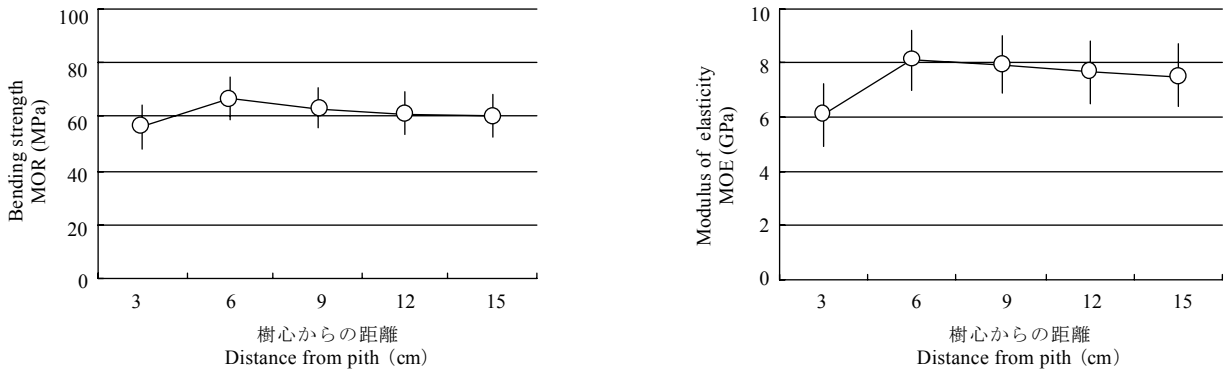
### 5.3　JIS の曲げ試験

#### 5.3.1　JIS の曲げ試験での変異

全個体の最大値と最小値の範囲はMORが43.8～81.7 MPaで標準偏差は6.47 MPa，平均値は62.1 MPaで，MOEは4.98～9.90 GPaで標準偏差は0.92 GPaで平均値は7.48 GPaであった。

曲げ試験片での年輪幅と密度は，年輪幅の範囲が1.22～6.79 mmで標準偏差は0.93 mm，平均値は3.82 mmであり，密度は0.321～0.493 g/cm$^3$で標準偏差は0.082 g/cm$^3$，平均値が0.394 g/cm$^3$であった。曲げ試験のMOEとMORの樹幹内変動を**第6図**に示す。図は樹心からの距離ごとに全試料を平均したもので，No.1～No.5まで掲載したものである。試料No.1（樹心から3cm）はMORが56.2 MPa，MOEが6.11 GPaで，試料No.2はMORが66.4 MPa，MOEが8.12 GPaでともに最大値をとなり，その後値は漸減した。試料は初期成長が小さく外側で年輪幅が増加し，密度が減少する試料なので，外側で値の増加は見られなかった。

強度値は未成熟材部と成熟材部に分けて検討することはよく行われるが，本試験でも同様の検討を試みた。年輪数は試料によって大きく異なるが，X線デンシトメトリでの年輪幅の変動から，樹心に近い試料No.1の年輪は樹心から7～22年輪までであった。この年輪数は，おおむね未成熟材部[16,17]に該当すると考えてよい。未成熟材部に該当する試料No.1のMORの値は56.2 MPaで範囲は31.7～71.3 MPa，MOEは6.11 GPaで範囲は3.75～9.55 GPaであった。試料No.1を除いた平均値は，MORが64.4 MPaで，MOEが7.98 GPaであった。試料No.1の値はNo.2以降の平均値よりもMORが13%，MOEが24%小さかった。スギのMOEが未成熟材部で小さいことは良




**第 6 図　MOR と MOE の樹幹内変動**

Fig. 6. Variations of MOR and MOE within stem in bending test of small clear specimens.

凡例）○は平均値，縦棒は標準偏差を示す。

Legend) Symbols and vertical bars denote average and standard deviation.

く知られている[18]。著者らが実施したスギの未成熟材部のMOEは3.80 GPa[19] であり，本試験での結果6.10 GPa よりも小さかった。

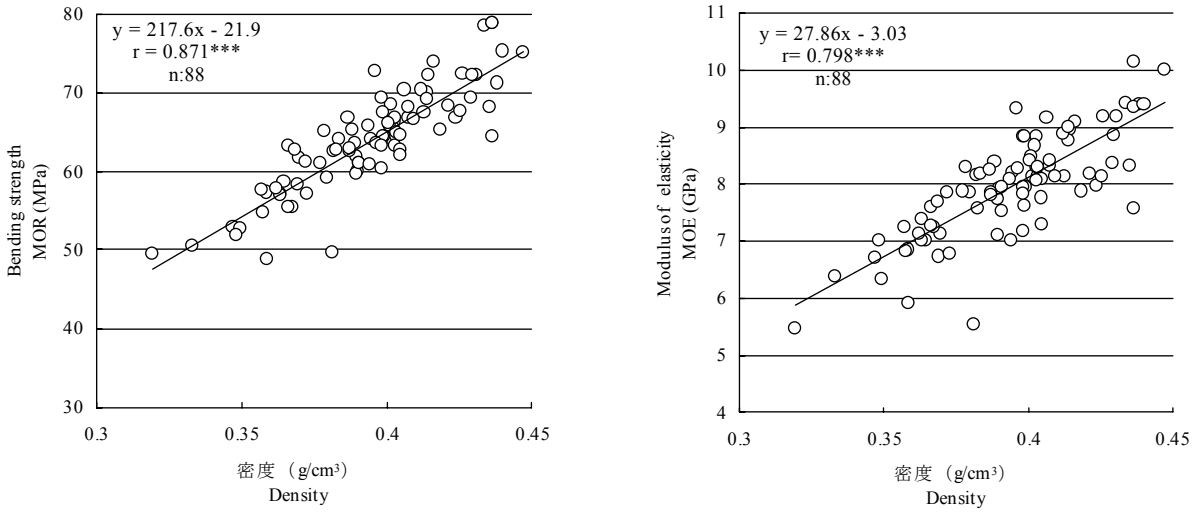
5.3.2　JIS の曲げ試験での選抜

次にJISの曲げ試験による選抜について検討した。トドマツの精英樹クローンをJISの強度試験値で選抜した事例はないが，トドマツの平均値[20] を用いて検討することが妥当であると考える。この値はMORが650 kgf/cm$^2$ でMOEが80 tf/cm$^2$ である。これらの値はMPaとGPa に換算するとMORが63.7 MPa でMOEが7.84 GPa となる。この値を便宜上，基準値 A とする。本試験のクローンでの総平均は，MORが61.9 MPa でMOEが7.46 GPaである。両形質とも基準値Aを下回っているが，その理由として基準値A は天然木を用い，未成熟材部が含まれていないものと考えられる。前述したように，未成熟材部の試料No.1 の値は小さいことから，これを含んだ平均値は過小評価となる。したがって，樹心に近い試料No.1 を除いた値を用い，トドマツ精英樹の選抜の基準値を検討した。試料No.1 を除いたクローンの平均値はMOR が64.1 MPa で，MOE は7.98 GPa であった。これらの値は基準値A を若干上回っている。このことから，本試験でのトドマツ精英樹のMOR やMOE の平均値は基準値A と同等であり，強度値が特に優れているものではないことが推察される。

供試した精英樹クローンの選抜に基準値A を用いると半数が基準値以下となる。5 割の選抜は現役の採種園の体質改善には強度であり，現実的な選抜率ではない。前述したように，密度での選抜基準値は0.38 g/cm$^3$ としているので，MOR と密度，MOE と密度との関係式から，選抜基準値を検討した。**第 7 図**にクローンの平均値を用いた密度と MOR，密度とMOE の関係を示した。両者の間には r=0.871 と r=0.798 の高い相関があり，直線回帰式から密度 0.38 g/cm$^3$ に相当する値を得た。その結果，MOR が 60.8 MPa でMOE が 7.56 GPa であり，それを基準値とし，クローンを選抜した。

供試した 88 クローンの内，MOR の基準値以上のものは，全クローンの 73.9 %に相当する 65 クローンで，その平均値は66.8 MPa，MOE は全クローンの70.5 %に相当する 62 クローンで，その平均値は 8.41 GPa であった。

MORで基準値未満のクローン数は23でその平均値は55.7 MPaであった。産地ごとの内訳は，道西南4，函館・日高4，道央7，道東4，根釧4 であった。MOE で基準値未満のクローン数は26 で，その平均値は6.89 GPa であった。産地ごとの内訳は，道西南5，函館・日高8，道央8，道東4，根釧4であり，両形質とも根釧の比率が高かった。また，天然林，人工林別では，MORが天然林8，人工林 15 でMOEが天然林 10，人工林 16 であり，出現の比率に大きな差はなかった。集団選抜育種では多形質での選抜が望ましい。たとえば，成長の優れているものだけを選抜すると強度の劣ったものの選抜になるかもしれないので強度も加味されなければならない。本試験では年輪密度と曲げ試験のMORとMOEで選抜したが，各形質とも高い相関関係があり，重複して選抜されたクローンも多い。現役採種園の体質改善が目




**第 7 図　クローンごとの密度と MOR，MOE の関係**

Fig. 7. The relationship between density, MOR, and MOE of clones.

凡例）n：クローン数，***：危険率 0.1% 水準で有意

注）値は樹心に近い試料 No.1 を除いた平均値である。

Legend) n: Number of individual clones, ***: Significant at the 0.1% level, MOR, MOE: See legend to Table 2.

Note) Values are average of each clone except No.1 specimens, which are nearest from the pith.

的であるので，優れたものを選抜するのではなく，基準値未満のものを選び，不良クローンとして除去することで採種園の体質改善が実現する。**第 5 表**に 2 または 3 形質で基準値未満となったクローンとそれらの値を掲載した。22クローンのうち3形質とも基準値未満のクローンは17クローンであり，2形質で基準値未満のクローンは5クローンであった。

5.3.3　JIS の曲げ試験での遺伝率

次に，クローンにおける MOR と MOE の反復率の検討を行った。分散分析の結果から，MOR と MOE の反復率は高く，0.64 と 0.68 が得られており，材質の改良に適した形質であると思われた。試料No.1～No.3 についても個々に反復率を求めた結果，MOR は 0.42，0.51，0.59 であり，外側ほど高い。MOE はそれぞれ 0.56，0.54，0.56 であり，樹心に近い部位でも反復率は高い。クローンの MOR と MOE の反復率は樹心に近い部位でも比較的高いことに加え，試料No.1とその外側との関係はMORがr=0.616でMOEがr=0.628と比較的高い相関が認められることから，若齢時での選抜が可能な形質であることが分かった。また，産地ごとの反復率は MOR が道西南 0.59，函館・日高 0.65，道央 0.60，道東 0.78，根釧 0.31 で，MOE が道西南 0.68，函館・日高 0.75，道央 0.52，道東 0.79，根釧 0.30 であった。根釧を除いた産地では高い反復率であった。

## 6.　まとめ

本研究は，新冠のトドマツ採種園の材質と変異を把握し，材質を改良するためのクローンの選抜を目的として実施した。精英樹88クローンを用い，トドマツの構造材としての利用を目的とし，年輪密度と強度に着目した選抜の基準値を設けた。また，広義の遺伝率である反復率を推定した。採種園の体質改善のための選抜基準値は年輪密度を0.380 g/cm$^3$, MORが60.8MPaでMOEが7.56 GPaとした。反復率は密度が0.46，MOR が 0.64，MOE が 0.68 であり，比較的高い値を示し，改良効果の高い形質と思われた。多形質に優れたクローンの選抜が望ましいことから，年輪密度，MOR，MOE で 2 または 3 形質で基準値未満のクローンは22クローンであった。これらのクローンは採種園の体質改善を実現するための除去すべきクローンと考えられる。

## 7.　おわりに

トドマツ精英樹の材質と遺伝的変異を解明するため，精英樹クローンを用いた年輪解析と強度試験を実施し，選抜の基準値や反復率等の知見を得ることができた。今後，他の形質での検定や精英樹の子供である次代検定林での検定も実施し，トドマツ精英樹の材質や遺伝的変異を明らかにし，今後の材質育種の発展に寄与したいと考える。

第 5 表　選抜基準値未満のクローンと値

Table 5. Clones under the values of criteria for improving wood properties and their values.

| 産地 Provenance | クローン名 Name of Clone | | RD (g/cm$^3$) Ring density | MOR (MPa) Bending strength | MOE (GPa) Modules of elasticity |
|---|---|---|---|---|---|
| 道西南 Douseinan | 岩見沢1 | Iwamizawa 1 | 0.332 | 49.5 | 5.48 |
| | 岩見沢105 | Iwamizawa 105 | 0.377 | 58.3 | 6.75 |
| | 倶知安 101 | Kutchan 101 | 0.342 | 57.4 | 6.84 |
| | 苫小牧109 | Tomakomai 109 | 0.370 | 59.1 | - |
| 函館・日高 Hakodate・Hidaka | 函館 1 | Hakodate 1 | 0.359 | 59.7 | 7.10 |
| | 函館6 | Hakodate 6 | 0.361 | 50.4 | 6.38 |
| | 函館4 | Hakodate 4 | - | 58.6 | 7.01 |
| 道央 Douou | 旭川 2 | Asahikawa 2 | 0.339 | 53.0 | 6.72 |
| | 雄武6 | Oumu 6 | 0.354 | 52.6 | 6.34 |
| | 雄武103 | Oumu 103 | 0.370 | 57.2 | 6.77 |
| | 興部2 | Okoppe 2 | 0.353 | 49.7 | 5.53 |
| | 興部4 | Okoppe 4 | 0.378 | 57.1 | 6.99 |
| | 旭川103 | Asahikawa 103 | - | 60.2 | 7.18 |
| | 名寄9 | Nayoro 9 | - | 60.7 | 6.99 |
| 道東 Doutou | 池田34 | Ikeda 34 | 0.344 | 48.9 | 5.90 |
| | 池田26 | Ikeda 26 | 0.358 | 51.9 | 6.99 |
| | 池田9 | Ikeda 9 | 0.338 | 55.4 | 7.22 |
| | 十勝8 | Tokachi 8 | 0.339 | 57.5 | 7.25 |
| 根釧 Konsen | 厚岸 1 | Akkeshi 1 | 0.369 | 57.0 | 7.40 |
| | 厚岸 111 | Akkeshi 111 | 0.370 | 54.8 | 6.81 |
| | 厚岸 121 | Akkeshi 121 | 0.355 | 55.5 | 7.25 |
| | 厚岸 113 | Akkeshi 113 | - | 57.8 | 7.11 |

凡例)- は基準値以上を示す。
注)2か3の形質で基準値未満のクローンを掲載した。
Legend) -: Means over the values of criterion.
Note) Selected clones mean under the values of criteria for 2 or 3 factors.


## 謝　　辞

本試験を遂行するにあたり，日高森づくりセンターの職員の方々には，試料採取にともなう選木，伐採等に多大なるご協力，ご指導をいただいた。ここに深く感謝の意を表する。


## 文　　献


1) 畠山末吉：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，北海道林業試験場報告，**19**，1-91(1981).
2) 黒丸亮：トドマツ育種種苗の需給地域区分の効果，光珠内季報No.76, 1-3(1989).
3) 宮島寛：北大農演研報，**37**，789-815(1980).
4) 宮島寛：北大農演研報，**38**，315-321(1981).
5) 宮島寛：北大農演研報，**39**，191-212(1982).
6) 石田茂雄：北大農演研報，**17**，473-512(1955).
7) 石田茂雄：北大農演研報，**22**，273-373(1963).
8) 安久津久，藤本高明：第52回日本木材学会大会発表要旨集，57(2002).
9) 安久津久，来田和人，黒丸亮：第115回日林学術講演集 762(2004).
10) 野掘嘉裕：日本林学会誌，**76**，89-94 (1994).
11) 安久津久：未発表
12) 平川泰彦ほか3名：森林総研研究報告，No. 386, 32-41, (2003).
13) 藤沢義武，太田貞明，田島正啓：木材学会誌，**39**，875-882(1993).
14) Kadomatsu,M., Kudoh,H., Ujiie,M.: *Res.Bull. Hokkaido Univ.For.*, **51**,14-30 (1994).
15) 工藤弘，片寄髞，氏家雅男：北大農演研報，**50**，197-203 (1993).
16) 安久津久ほか4名：林産試験場報，**4**(1)，12-18 (2000).
17) 塩倉高義：木材学会誌，**28**，85-90(1982).
18) たとえば，日本木材学会研究分科会編："木材の科学と利用技術Ⅱ，5.スギ"，日本木材学会：10-13(1991).
19) 安久津久：第53回日本木材学会大会発表要旨集，57(2003).
20) 木材工業編集委員会編："日本の木材"，(社)日本木材加工技術協会，10-11(1989).



－利用部　主任研究員－
－*1：利用部　材質科－
－*2：北海道立林業試験場－


(原稿受理：05.12.6)