

# 北海道における針葉樹造林木の材質変異 および育種に関する基礎的研究\*

飯塚 和也<sup>(1)</sup>

Kazuya Iizuka<sup>(1)</sup>

## Variation and Breeding in Wood Quality of Conifer Plantation Trees in Hokkaido

### 目 次

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 第1章 序 論 .....                             | 86  |
| 第1節 研究の背景 .....                           | 86  |
| 第2節 研究の目的 .....                           | 88  |
| 第3節 研究で用いた統計的な解析方法 .....                  | 90  |
| 第2章 グイマツとカラマツの種間雑種の材質育種 .....             | 91  |
| 第1節 従来の研究および本研究の目的 .....                  | 91  |
| 第2節 グイマツとカラマツの容積密度数の特徴 .....              | 93  |
| 2.1 はじめに .....                            | 93  |
| 2.2 材料と方法 .....                           | 94  |
| 2.2.1 北海道に植栽された針葉樹における容積密度数の半径方向の変動 ..... | 94  |
| 2.2.2 グイマツとカラマツ精英樹クロンの容積密度数の遺伝変異 .....    | 94  |
| 2.3 結果と考察 .....                           | 95  |
| 2.3.1 北海道に植栽された針葉樹における容積密度数の半径方向の変動 ..... | 95  |
| 2.3.2 グイマツとカラマツ精英樹クロンの容積密度数の遺伝変異 .....    | 97  |
| 2.4 要 旨 .....                             | 102 |
| 第3節 グイマツとカラマツの種内および種間雑種の成長、材質諸形質の特徴 ..... | 102 |
| 3.1 はじめに .....                            | 102 |
| 3.2 材料と方法 .....                           | 102 |

(1) 林木育種センター北海道育種場

〒069-0836 北海道江別市文京台緑町561番地

Hokkaido Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center

561 Bunkiyodaimidorimachi, Ebetsu, Hokkaido 069-0836 Japan

\* 本論文は東京農工大学博士号(農学)請求論文である。

|         |                                |     |
|---------|--------------------------------|-----|
| 3.2.1   | 材料                             | 102 |
| 3.2.2   | 成長調査                           | 103 |
| 3.2.2.1 | 林木育種センター北海道育種場試験地              | 103 |
| 3.2.2.2 | 釧路試験地                          | 103 |
| 3.2.3   | 材質調査                           | 104 |
| 3.2.3.1 | 成長、根元曲りおよび幹曲りの測定               | 104 |
| 3.2.3.2 | 材質諸形質の測定                       | 104 |
| 3.3     | 結果と考察                          | 105 |
| 3.3.1   | 成長の特徴                          | 105 |
| 3.3.2   | 材質諸形質の特徴                       | 107 |
| 3.4     | 要 旨                            | 111 |
| 第4節     | グイマツ雑種F <sub>1</sub> 家系の材質変異   | 111 |
| 4.1     | はじめに                           | 111 |
| 4.2     | 材料と方法                          | 112 |
| 4.2.1   | 正逆家系およびグイマツ雑種F <sub>1</sub> 家系 | 112 |
| 4.2.2   | 親子回帰による容積密度数の狭義の遺伝率の推定         | 112 |
| 4.3     | 結果と考察                          | 112 |
| 4.3.1   | 正逆家系およびグイマツ雑種F <sub>1</sub> 家系 | 112 |
| 4.3.2   | 親子回帰による容積密度数の狭義の遺伝率の推定         | 119 |
| 4.4     | 要 旨                            | 122 |
| 第5節     | 総 括                            | 123 |
| 第3章     | アカエゾマツの材質と遺伝変異                 | 123 |
| 第1節     | 従来の研究および本研究の目的                 | 123 |
| 第2節     | 精英樹クローンの基本的な木材の性質              | 125 |
| 2.1     | はじめに                           | 125 |
| 2.2     | 材料と方法                          | 125 |
| 2.2.1   | 材料                             | 125 |
| 2.2.2   | 容積密度数の測定                       | 125 |
| 2.2.3   | 動的ヤング係数の測定                     | 125 |
| 2.2.4   | 節枝形質の測定                        | 126 |
| 2.2.5   | 形質の産地間比較                       | 126 |
| 2.3     | 結果と考察                          | 126 |
| 2.3.1   | 容積密度数                          | 126 |
| 2.3.2   | 動的ヤング係数および節枝形質                 | 128 |
| 2.3.3   | 形質間の相互関係                       | 129 |

|         |                      |     |
|---------|----------------------|-----|
| 2.3.4   | 形質の産地間比較             | 131 |
| 2.4     | 要 旨                  | 133 |
| 第3節     | 精英樹クローンの成長および材質の遺伝変異 | 134 |
| 3.1     | はじめに                 | 134 |
| 3.2     | 材料と方法                | 134 |
| 3.2.1   | 精英樹クローンの成長調査         | 134 |
| 3.2.2   | 精英樹クローンの材質調査         | 135 |
| 3.2.3   | 統計的な解析方法             | 135 |
| 3.3     | 結果と考察                | 136 |
| 3.3.1   | 精英樹クローンの成長特性         | 136 |
| 3.3.1.1 | クローン間差および反復率の年次変化    | 136 |
| 3.3.1.2 | 形質間の相互関係             | 137 |
| 3.3.1.3 | 採種園間の比較              | 138 |
| 3.3.2   | 精英樹クローンの材質特性         | 142 |
| 3.3.2.1 | クローン間差および形質間の相互関係    | 142 |
| 3.3.2.2 | 採種園間の比較              | 143 |
| 3.4     | 要 旨                  | 145 |
| 第4節     | 産地別の実生の成長および容積密度数    | 146 |
| 4.1     | はじめに                 | 146 |
| 4.2     | 材料と方法                | 146 |
| 4.2.1   | 成長調査                 | 146 |
| 4.2.2   | 容積密度数の調査             | 148 |
| 4.3     | 結果と考察                | 148 |
| 4.3.1   | 成長の産地間比較             | 148 |
| 4.3.2   | 容積密度数の産地間比較          | 151 |
| 4.4     | 要 旨                  | 153 |
| 第5節     | 総 括                  | 153 |
| 第4章     | トドマツの材質変異と育種         | 154 |
| 第1節     | 従来の研究および本研究の目的       | 154 |
| 第2節     | 精英樹クローンの基本的な木材の性質    | 155 |
| 2.1     | はじめに                 | 155 |
| 2.2     | 材料と方法                | 156 |
| 2.2.1   | 材質諸形質の調査             | 156 |
| 2.2.1.1 | 材料                   | 156 |
| 2.2.1.2 | 容積密度数の測定             | 156 |

|         |                        |     |
|---------|------------------------|-----|
| 2.2.1.3 | 動的ヤング係数の測定             | 156 |
| 2.2.1.4 | 節枝形質の測定                | 157 |
| 2.2.2   | 生材含水率の測定               | 157 |
| 2.2.2.1 | 材料                     | 157 |
| 2.2.2.2 | 生材含水率および水食い材率の測定       | 157 |
| 2.2.2.3 | 水食い材および乾燥心材部の生材含水率の測定  | 158 |
| 2.2.2.4 | 元玉丸太の生材密度の測定           | 158 |
| 2.3     | 結果と考察                  | 158 |
| 2.3.1   | 材質諸形質の特性               | 158 |
| 2.3.1.1 | クローン間差                 | 158 |
| 2.3.1.2 | 形質間の相互関係               | 160 |
| 2.3.2   | 生材含水率の特徴               | 162 |
| 2.3.2.1 | クローン間差                 | 162 |
| 2.3.2.2 | 心材の含水率                 | 164 |
| 2.3.2.3 | 形質間の相互関係               | 165 |
| 2.4     | 要 旨                    | 167 |
| 第3節     | 精英樹クロンの成長および材質の遺伝変異    | 168 |
| 3.1     | はじめに                   | 168 |
| 3.2     | 材料と方法                  | 168 |
| 3.2.1   | 精英樹クロンの成長調査            | 168 |
| 3.2.2   | 精英樹クロンの材質調査            | 169 |
| 3.3     | 結果と考察                  | 169 |
| 3.3.1   | 精英樹クロンの成長特性            | 169 |
| 3.3.2   | 精英樹クロンの材質特性            | 172 |
| 3.4     | 要 旨                    | 173 |
| 第4節     | 実生家系の材質育種              | 174 |
| 4.1     | はじめに                   | 174 |
| 4.2     | 材料と方法                  | 174 |
| 4.2.1   | 自然交配家系                 | 174 |
| 4.2.2   | 人工交配家系                 | 175 |
| 4.2.3   | トドマツとウラジロモミおよびシラベの種間雑種 | 175 |
| 4.3     | 結果と考察                  | 176 |
| 4.3.1   | 自然交配家系                 | 176 |
| 4.3.2   | 人工交配家系                 | 179 |
| 4.3.3   | トドマツとウラジロモミおよびシラベの種間雑種 | 184 |
| 4.4     | 要 旨                    | 187 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第5節 総括 .....                 | 187 |
| 第5章 結論 .....                 | 188 |
| 1. グイマツとカラマツの種間雑種の材質育種 ..... | 188 |
| 2. アカエゾマツの材質と遺伝変異 .....      | 189 |
| 3. トドマツの材質変異と育種 .....        | 190 |
| 4. 材質形質の遺伝性および採種園の改良 .....   | 190 |
| 5. 北海道における材質育種の方向性 .....     | 191 |
| 5.1 実生家系の成長および容積密度数 .....    | 191 |
| 5.2 材質育種の方向性 .....           | 191 |
| 摘 要 .....                    | 193 |
| Summary .....                | 194 |
| 謝 辞 .....                    | 196 |
| 引用文献 .....                   | 197 |
| 補 遺「用語の解説」 .....             | 207 |

## 第1章 序 論

### 第1節 研究の背景

木質資源は、化石資源と異なって再生産が可能であり、最終製品に加工する際のエネルギー消費が少なくすむことが最近見直されてきた。また、木質資源の生産と利用において、国土保全などの公益的役割との調和を図ることが、ますます重要になってきている。木材の利用技術では、最終用途に結びついた最適な加工システムを検討するとともに、住宅などの最終製品における耐久性を図ることも、資源の有効利用につながる重要な課題である（山井，1988）。

現在、世界的な林業の動向は、天然林開発林業から短伐期林業へ、大径材から中・小径材に木材生産が変化しており、これには木材加工技術による利用開発の進展が見られる（岩井，1998）。特に、木材輸出国であるチリとニュージーランドの短伐期林業では、外国から導入されたラジアータマツ（*Pinus radiata*）の人工造林木が木材生産の資源基盤である（柳幸，1998）。輸入木材は品質が優れているばかりでなく、需要に対して、大量供給、弾力的供給という＜消費重視型＞であるが、我が国の林業は、木材を生産したときに終了する＜生産重視型＞である（田嶋，1998）。今日、輸入木材への依存が強まり、1997年に我が国の木材自給率は20%を割り込んでいる（林野庁，1999）。今後、住宅建築の様式やシステム、生活スタイルの変化、あるいは木材価格の問題で、国産材離れがさらに進む可能性があると思われる。我が国において、消費者のニーズに応える国産材を育成するためには、強度や耐久性の優れた造林樹種の品種および建築・住宅資材の開発に関する研究が必要であると考えられる。

林木の諸形質は一般的に大きな遺伝変異を含むため、林木育種では集団選抜が基本となっている。我が国において、1954年に林野庁が成長と樹形を選抜基準に重点を置いた精英樹選抜による育種計画を樹立し、国有林において精英樹選抜事業が開始された。その結果、今日、我が国では9,029個体の精英樹が選抜されて、主要な造林樹種については、スギ（*Cryptomeria japonica*）で3,659個体、ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）で1,058個体、カラマツ（*Larix kaempferi*）で527個体の精英樹が選抜された（林野庁林木育種センター，1999）。北海道の主要な針葉樹造林樹種については、天然林を主体に、郷土樹種のトドマツ（*Abies sachalinensis*）で782個体、アカエゾマツ（*Picea glehnii*）で322個体およびクロエゾマツ（*Picea jezoensis*）で147個体、一方人工林では、本州から導入されたカラマツで270個体、千島列島と樺太から導入されたグイマツ（*L.gmelini* var. *japonica*）で82個体の精英樹が選抜された。これらの樹種は、針葉樹の選抜個体数1,762個体の91%を占めている。選抜された精英樹は、つぎ木クローン化され、北海道の各地に設定された採種園に植栽されるとともに、林木育種センター北海道育種場の育種素材保存園に保存されている（林木育種センター北海道育種場，1998）。

北海道においては、育種事業が開始されて40年足らずであるため、それに伴う人工造林事業の歴史は浅い。また、精英樹として選抜された個体の諸形質の特性が把握される以前に、事業用の採種園が造成されており、精英樹の特性に基づいた採種園の管理が不可欠である。精英樹（プラス木）として選抜された個体については、本来的には、精英樹候補木あるいは育種素材木であるため、諸形質の特性評価に基づき、プラス木の中から、エリート木を選定するべきであると考えられる。実際には、諸形質の特性の検定と評価には長期間を有するため、検定と評価を進めながら、優れた形質を有するクローンの増殖・保存および次世代化を図っている。北海道の人工造林では、種子によ

る実生苗が植栽されるため、設定済みの採種園を優れた形質のクローン構成にするため、改良あるいは誘導することが重要となる。

北海道の人工造林事業の場合、1950年代から60年代の拡大造林時代には、造林技術の蓄積が少なく、未熟であったため、造林不適地への造林、あるいは保育・管理不足などによる不成績造林地が各地に発生した。現在、主要な造林樹種は、アカエゾマツ、トドマツ、カラマツ、およびグイマツを母樹としてカラマツを花粉親とした種間雑種であるグイマツ雑種  $F_1$  (*L. gmelini* var. *japonica* × *L. kaempferi*) (第2章第1節を参照) である。国有林と道有林では主にアカエゾマツとトドマツ、一般民有林ではカラマツ類を中心に植栽されている。全体的に人工造林面積が減少傾向にある中で、1994年度から1998年度の過去5年間における年平均の人工造林面積は、アカエゾマツを主体としたエゾマツ類で2,053ha、カラマツ類で2,028ha、トドマツで1,591haであり、この3樹種で人工造林面積の6,596haの86%を占めている(北海道水産林務部, 2000)。気象害の危険性のある高海拔地にアカエゾマツ、それよりも海拔の低い地域にトドマツ、そして、里山地域にカラマツ類が造林される傾向がある。1999年3月31日現在の累計人工造林面積は1,517千haであり、トドマツで787千ha(人工造林面積の52%)、カラマツ類で459千ha(30%)およびエゾマツ類で149千ha(10%)である(北海道水産林務部, 1999)。最近では、択伐・天然更新を中心とした森林施業も積極的に進められている。

林木育種に関して、Zobel (1971) は、対象形質として、成長、樹形、適応性、病虫害等抵抗性、つぎに材質育種が重要であると説明している。また千葉 (1988) は、育種が事業であることについて、森林は野生集団で遺伝的多様性があること、林木の巨大性と生産期間の超長期性、および多くの精英樹間の自然交配による遺伝子群で造林し、林の安全性を確保していくことが重要であり、これらは林木の特性に由来するものであると述べている。また、北海道における特定形質の育種として、耐鼠性(野ねずみに被害される程度)、病虫害抵抗性、気象害抵抗性および材質育種を挙げている。このことから、林木育種は樹木として森林資源の造成が早く確実に達成され、木材として用途に応じた材質の優れた品種の開発を目指すことが必要である。

品種改良については、木材の成長量の促進、病虫害に対する抵抗性の付与など、生産量拡大を求める生産者対策に専念し、材質などの消費者対策には手をつけなかったという批判がある(田嶋, 1998)。さらに品種改良の成果としては、農林水産省に品種登録された北海ポプラ(王子製紙)(千葉, 1989)とカラマツ(グイマツ雑種  $F_1$ )(東大北海道演習林)(倉橋, 1989)のみであると指摘されている(野堀, 1995)。しかし宮島(1995)は、ラジアータマツのように成長が速く、かつ用途の広い木材を生産できる樹種の選定、あるいは林木育種による品種の作出が望まれ、北海道では各地に適応したグイマツ雑種  $F_1$  にその可能性があることを述べている。一方、有馬(1988)は、木材の強度等級区分に関する今後の展開において、同じ樹種であっても強度分布が異なり、それが生育した環境、あるいは遺伝、育種上の特性、節などの組織的特性が、木材の強度特性に与える度合いがきわめて大きいことを指摘している。さらに、立木段階あるいは苗木の段階で、その材の材質特性に基づいた用途を見極めること、それに適合する保育・伐採計画を進めることが必要であると述べている。このため、実生の造林木では、採種園における母樹の子供家系の材質特性を明らかにすることが重要である。

以上のことから、北海道において、天然力を活用した森林資源の育成のほかに、早急な資源回復および確実な森林造成のために、それぞれの地域に適応した品種改良、特にニーズに適合した材質に関する品種改良を進めることが必要であると考えられる。

## 第2節 研究の目的

我が国では、重量成長が非常に早いユーカリのようなパルプ適木を目的とした超短伐期林業のための材質育種(小名ら, 1994, 1995)は困難であると考えられる。このため、強度および耐久性を備えた建築・住宅資材を目的とした材質に関する品種改良を進めることが、国民の国産材への関心および木材工業の寄与につながる可能性があると考えられる。そのため、それぞれの樹種における材質変異に関する基礎的な情報の蓄積を図り、樹種の特性に適合した材質に関する育種戦略を考えて、事業的に実践する必要がある。

北海道における林木育種事業は開始されてから日が浅く、また、樹木の成長には長期間を要するため、選抜された精英樹として育種素材の諸形質に関する樹種やクローンに関する諸形質の特性の把握が十分でない状況である。しかし造林樹種の場合、カラマツの材質に関して、多くの研究成果が報告されている。例えば、材質指標の変動(塩倉, 1981)、旋回木理と乾燥ねじれの関係(小沢, 1984)および旋回木理における遺伝的改良の可能性(三上, 1988)が報告されている。また小泉(1988)は、体重負荷方式による非破壊検査法を開発し、高田(1994)は、その検査法に基づいた立木の曲げヤング係数による材質育種の可能性を提示した。さらに武井(1998)は、材質向上のための施業に関する研究を行った。また、グイマツ雑種 $F_1$ の場合、小野寺ら(1977)は、樹種特性について詳細な材質調査を行い、大島(2000)は、成長、材の強度、幹曲り、材のねじれに対する育種的な改良の可能性について述べている。従来の研究では、カラマツ類についての材質育種が進められているが、一方、北海道の郷土樹種であるアカエゾマツ、トドマツの材質特性および遺伝変異に関する詳細な報告はみられない。

本研究では、北海道における育種成果の代表といわれるグイマツ雑種 $F_1$ 、主要な造林樹種であるアカエゾマツおよび累計の人工造林面積の最も多いトドマツの3樹種を調査対象樹種とした。カラマツについては、造林上の重大な障害である野ねずみへの対策(森林総合研究所北海道支所, 1994)および先枯病の問題(横田, 1964)が重要になると考えられる。このためグイマツ雑種 $F_1$ の交雑親として、グイマツとカラマツを検討した。

これらの造林樹種の材質における特徴に関して、深沢(1982)はつぎのように述べている。グイマツ雑種 $F_1$ の場合、花粉親であるカラマツは、針葉樹としては重くかつ硬い方の材に属するが、大きな欠点として、らせん木理に起因するねじれ、狂いが生じやすい。種間雑種であるグイマツ雑種 $F_1$ は、幹の曲りが少なく、繊維傾斜度は花粉親の影響を受けているが、材密度は母樹の影響を受けて、交雑種では材密度が大きくなり、構造材などの強さが要求されるものには有利となることを指摘している。またアカエゾマツは、トドマツと同様に材密度が低く、軽軟な材に属し、トドマツでは、自然的な欠点が非常に多く発生し、特に水食い材に関する諸問題点が指摘されている。一方、宮島(1982b)は、一般的に早期育成木の条件として、樹高、肥大成長ともに優れており、林木の育成では、木造住宅の構造材ならびに内装材の生産を目的にするべきであるとしている。そして針葉樹の健全材の場合、一般的に年輪幅が広くなれば材密度が減じ、力学的性質も低下するので、1年輪内で占有率の高い早材部の材密度を高めるための育種の必要性を指摘している。

これらの状況を踏まえて、本研究では、北海道における樹種特性および材質の育種的改良の可能性を検討する目的で、成長および材質に関する早期の評価の可能性を考慮しながら、それぞれの樹種の材質変異について議論した。材質変異を研究するには、多数の由来の明らかな系統の指標となる形質を調べ、それを統計的方法で解析する必要があると考えられる。このため、調査形質は、重要な材質指標であること、大量に材料の入手が可能で、簡易の方法で効率的に測定できることが有効であると考えられる。そこで、建築・住宅資材の重要な指標である強度と関係があるといわれる容積密度数および動的ヤング係数を主な材質指標とした。従って本研究の調査形質は、成長

特性として樹高、胸高直径、材質特性として容積密度数、年輪幅および動的ヤング係数とした。供試個体を円板で入手した材料では、容積密度数と年輪幅、丸太で入手した材料では、容積密度数と年輪幅および打撃音法による動的ヤング係数を調査した。特にグイマツ雑種 $F_1$ では、根元曲り、幹曲りおよび繊維傾斜度、トドマツでは、水食い材に関する調査を行った。材質調査のために伐採した個体数は、精英樹クローンで501個体、実生の植栽木で869個体の合計で1,370個体である。また53個体については、成長錘で採取した試験体を調査した。

材料は、林木育種センター北海道育種場の育種素材保存園および採種園に植栽された精英樹クローン、そして各試験地に植栽された自然交配家系、人工交配（交雑）家系、並びに産地別に収集・植栽された次代を対象に、遺伝的な由来の明らかな素材を供試した。これらの材料は、成長と樹形に重点を置いた林野庁の精英樹選抜育種事業で選ばれた精英樹クローンおよびそれらの子供家系（次代）が主体である。

精英樹クローンは、造林用種苗を生産する採種園を構成する母樹および花粉親に用いられる。このため、グイマツ、カラマツ、アカエゾマツおよびトドマツの容積密度数のクローン間変異および遺伝的要因の寄与の目安となる反復率を算出し、クローンの再現性を検討した。採種園では、1クローンにつき複数の個体がランダムに植栽されているため、再現性の低い形質および変異の少ない形質は、育種的な改良効果が期待されないと考えられる。

一般的に造林用種子は、採種園において花粉親が特定されない母樹から採種される。このため、精英樹クローンの材質特性を考慮した採種園の改良、管理の有効性を検討することが必要であり、子供家系の材質形質に関する家系間変異、さらに母樹と花粉親の特性の遺伝性を明らかにすることが不可欠である。両親から子供家系への遺伝性については、両親クローンとその子供家系の回帰により、相関関係の高い形質で遺伝性があると考えられる。このため、グイマツ雑種 $F_1$ およびトドマツでは、容積密度数の親子回帰から狭義の遺伝率を推定した。またグイマツ雑種 $F_1$ について、交雑親である母樹および花粉親の子供家系に及ぼす遺伝性に関して議論した。

本論文では、得られた結果に基づき、北海道における針葉樹造林樹種の材質変異を明らかにし、材質の育種的改良の可能性と方向性について検討した。まず第1章で、研究の背景と目的を述べ、第2章で、導入樹種であるグイマツとカラマツの種間雑種であるグイマツ雑種 $F_1$ について、材質育種の可能性および方向性を議論する。グイマツ雑種 $F_1$ の交雑親であるグイマツとカラマツの容積密度数の特徴と反復率について検討した。つぎに、人工交雑で得た種内および種間雑種の実生家系について、若齢期における成長、根元曲り、幹曲り、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度の特徴と諸形質の改良効果を検討した。また諸形質について、完全ダイアレルクロスによるグイマツとカラマツから得た正逆家系間の関係を調べて、それぞれの形質における母樹および花粉親の子供家系への遺伝性を検討した。さらにグイマツ雑種 $F_1$ について、両親クローンと子供家系の親子回帰から、容積密度数の狭義の遺伝率を推定した。これらの結果に基づいて、グイマツ雑種 $F_1$ について、材質の優れた品種の開発および採種園の改良について議論する。

第3章では、郷土樹種であるアカエゾマツの材質と遺伝変異について議論する。まず、精英樹クローンの容積密度数、動的ヤング係数、節枝形質のクローン間および産地間変異を検討した。つぎに、採種園に植栽されている精英樹クローンの樹高、胸高直径および容積密度数について、反復率を算出するとともに、遠隔地に植栽されたクローン間の関係を検討した。さらにアカエゾマツは、針広混交林を構成することがなく、特殊な土壌に成林するといわれているため、北海道の脊梁山脈で区分した東西性（水平分布）、垂直分布および産地の土壌母材の観点から、産地毎に採種された実生で設計された試験地における成長および容積密度数の変異を検討した。これらの結果に基づいて、アカエゾマツの成長および材質の特徴について議論する。

第4章では、郷土樹種であるトドマツの材質変異および育種について議論する。まず、精英樹クローンの容積密度数、動的ヤング係数、節枝形質および水食い材に関する特徴とクローン間変異を検討した。また精英樹クローンの樹高、胸高直径、容積密度数、水食い材および動的ヤング係数の反復率について検討した。実生家系については、自然交配家系、人工交配家系、並びにトドマツとウラジロモミおよびシラベとの種間雑種の容積密度数の変異を検討し、さらに、人工交配家系の両親クローンと子供家系の親子回帰から、容積密度数の狭義の遺伝率を推定した。これらの結果に基づいて、トドマツの材質を考慮した採種園の改良について議論する。

最後に第5章では、本研究におけるクローン間変異、家系間変異および材質の遺伝性についての議論に基づいた結論として、北海道における針葉樹造林木であるグイマツ雑種 $F_1$ の育種の改良の方向性、アカエゾマツおよびトドマツの材質変異、さらに母樹と花粉親の材質を考慮した採種園の改良と育種の進め方について考察する。

なお、本研究で用いた専門用語の解説を、「補遺. 用語の解説」に記載した。

### 第3節 研究で用いた統計的な解析方法

本研究で測定した形質の値は、表現型値  $P$  (phenotypic value) であり、平均値、分散などの観察値は、表現型値に基づいている。集団の遺伝的特徴を分析するためには、表現型値をいくつかの異なる成分に分割する必要がある。表現型値は、遺伝子型 (genotype) の効果による値と環境 (environment) の効果に分割される。遺伝子型は、個体を持つ遺伝子の特性で、環境とは、表現型に影響を及ぼすすべての非遺伝的要因である。遺伝子型および環境の値を、それぞれ遺伝子型値  $G$  (genotype value)、環境偏差  $E$  (environment deviation) といい、表現型値は、 $P = G + E$  で表される。

変異を研究する際の基本的な考え方は、変異を異なる要因による成分に分割することであり、変異の量は分散として測定される。遺伝子型分散は遺伝子型の分散、環境分散は環境偏差の分散である (ファルコナー, 1993)。

本研究では、成長および材質形質の遺伝的要因の解析は、それぞれの形質における系統を要因とした分散分析法に基づいて行われた。分散分析法とは、いくつかの無作為標本群の平均値間に有意な差があるかどうか、均一性を検討する方法で、標本全体の変動を標本群の平均値間の変動と個体変動などに分割して、それぞれの分散比を調べ、変動の要因が有意であるかどうかを判断するものである (塚本, 1958)。系統間分散と系統内分散の比である分散比については、系統間分散が大きく、系統内分散が小さいほど分散比が高くなり、系統間の変異が大きく、遺伝性が高いと考えられる。それぞれのクローン (系統) の各個体が単木混交で植栽されている採種園では、クローンにおける環境による差が無視できるほど小さいと考えられる。このため、分散分析の結果から、遺伝的寄与の大きさの目安になる広義の遺伝率  $H^2$  (broad sense heritability) ( $= V_G / V_P$ ,  $V_G$ : 遺伝子型分散,  $V_P$ : 表現型分散) が算出できる。無作為集団からのクローンの場合は広義の遺伝率というが、明石 (1988) は精英樹クローンの場合は無作為集団でないため、広義の遺伝率というより反復率 (repeatability) であるとしている。反復率は遺伝的寄与の大きさの目安に用い、クローンのある形質の反復率が高い場合、その形質は、環境による影響が少なく、遺伝的寄与が高く再現性があると考えられる。

また、実生である子供の表現型が親から受けついだ遺伝子の効果によって決定された割合を、狭義の遺伝率  $h^2$  (narrow sense heritability) という。この遺伝率は、血縁固体 (系統) 間の類似性を表し、育種計画では重要である。本研究においては、子供の親への回帰から算出される遺伝率の推定を試みた。親子回帰から推定される遺伝率は、両親クローンの平均 (中間親) に対する子供家系の平均値の回帰係数として得ることができる (松尾, 1978)。中間親

と子供家系の分散に差異がある場合は、中間親と子供家系の偏差平方和に基づいて算出される補正係数を回帰係数に乗じて標準化し、狭義の遺伝率を推定できる (Wright, 1976)。推定された狭義の遺伝率が高い場合、親と子の間の遺伝的関係が高いと考えられる。

一方、林木は野生集団であり、系統発生、地理的分布、また多種多様な環境条件のもとで遺伝的な分化が生じ、遺伝子型と環境条件との複雑な交互作用 ( $G \times E$ ) の系のもとで集団が維持されている。交互作用は、いろいろな環境条件下で、多種類の遺伝子型がそれぞれ異なった反応を示すことであり、林木の育種において最高の遺伝獲得量を得るためには、この交互作用をできるだけ少なくすることが重要である (大庭, 1972)。このため、複数の採種園および試験地の系統間の相互関係を検討するために、系統間の相関係数、および複数の検定林に基づく分散分析 (明石, 1989b) を用いて交互作用について検討した。

本研究では、これらの統計的な解析方法により、遺伝的な由来の明らかな素材を供試材料として、それぞれの形質のクローン間変異、家系間変異、産地間変異、反復率および狭義の遺伝率を推定し、さらに形質間の相互関係を検討することで、遺伝変異に関して議論した。成長および材質形質の遺伝率の推定については、反復率は、精英樹クローンを供試した分散分析の結果を基に、表現型分散 (クローン分散 + 環境分散) に対する遺伝子型分散 (クローン分散) の比から算出した (明石, 1989a)。狭義の遺伝率は、人工交雑で得られた母樹と花粉親の明らかな実生家系の測定値と、その両親クローンの平均値 (中間親) における親子関係から推定した。

## 第2章 ギイマツとカラマツの種間雑種の材質育種

### 第1節 従来の研究および本研究の目的

北海道では、本州から導入したカラマツ (*Larix kaempferi*) は野ねずみ (エゾヤチネズミ: *Clethrionomys rufocanus bedfordiae*) に食害されやすく、林業関係者から野ねずみに食害され難いカラマツ品種の開発が強く望まれている。野ねずみに食害され難く、成長の良い第1代雑種を得ることを目的にしたカラマツ属の交雑試験は、1936～1938年に石原・松川 (1939, 1941) によるカラマツ、ギイマツ (*L. gmelinii* var. *japonica*) およびチョウセンカラマツ (*L. gmelinii* var. *olgensis*) の間で行われた。サハリンや千島列島に天然分布しているギイマツは、カラマツよりも初期成長は早くないが、野ねずみに食害され難いと言われてきた。種間交雑種に関する調査・研究の結果、母樹がギイマツで、花粉親がカラマツの種間雑種 (「ギイマツ雑種  $F_1$ 」と呼ぶ) は、野ねずみに食害され難く、初期成長が良好であることなど諸形質の特徴が明らかにされ、ギイマツ雑種  $F_1$  は、北海道における主要な造林樹種になってきた (高橋ら, 1968; 東ら, 1987)。また、倉橋 (1988) は、カラマツ属の交雑育種に関する約30年間の研究を集約して、種間雑種が示す種々の形態的、遺伝的および造林樹種としての特性を明らかにし、さらに、それらに基づいた優良な雑種の大量生産を図る方式について報告している。

一方、ギイマツ雑種  $F_1$  の材質に関する様々な特徴が報告されている。まず、ギイマツ雑種  $F_1$  の母樹と花粉親となるギイマツとカラマツに関してみると、札幌市近郊の野幌国有林に植栽された両樹種について、加納 (1956) は、成長の優良なものはカラマツで晩材率が高く、成長の劣勢なものはギイマツで晩材率が高いと報告している。中川 (1963) は、長野県に植栽された両樹種について、容積密度数と晩材率との間に比例的な関係が認められ、同一の年輪幅の範囲および晩材率における平均容積密度数では、ギイマツがカラマツよりも大きいことを示した。小野寺ら (1971) は、稚内営林署管内に植栽されたギイマツと幾寅営林署管内および東旭川町有林に植栽されたカラマツを比

較して、グイマツはカラマツより晩材率で7%,容積密度数で100kg/m<sup>3</sup>および容積全収縮率で2~3%大きな値を示すことを明らかにした。また深沢・川辺(1972)は、稚内営林署管内に植栽された両樹種について、容積密度数と晩材率の変動パターンから、両樹種ともに髄から半径5cmより内部を未成熟材と定め、その晩材率はグイマツで15~18%,カラマツで13~15%を示し、成熟材の値と比べるとかなり低く、50~60%の値であることを報告している。

グイマツ雑種F<sub>1</sub>に関しては、川口・高橋(1972)および小野寺ら(1977)は、同一林分に植栽された林齢11年生のカラマツ、グイマツ、チョウセンカラマツおよびそれらの種間雑種について、材質諸形質の特徴を報告した。グイマツ雑種F<sub>1</sub>は、グイマツよりも成長が良く、カラマツとほぼ同じ成長を示し、カラマツよりも林木の曲りの少ない点で優れている。また、旋回木理は一般的にS旋回であり、繊維傾斜度はグイマツの方がカラマツより大きく、グイマツ雑種F<sub>1</sub>はその中間的な値を示し、その最大値は樹齢5年までに出現する。晩材率は、グイマツ雑種F<sub>1</sub>で20.4%,グイマツで30.7%,そしてカラマツで18.7%を示し、容積密度数はカラマツに対して、グイマツ雑種F<sub>1</sub>で15%,グイマツで25%高い値を示すことが報告されている。

宮島・長谷川(1978)は、種間雑種カラマツ(カラマツ×チョウセンカラマツおよびカラマツ×グイマツ)の材質を調査し、カラマツ材に特有な各種の狂いは、この両雑種にも現れ、特に曲りとねじれがかなり大きいことを指摘している。また、二面交雑家系(グイマツとカラマツを母樹および花粉親に用いた種間雑種)に関して、胸高直径、樹高、幹曲りおよび容積密度数については、正逆の家系間に有意差が認められず、胸高直径、樹高および容積密度数では、それぞれの種内交配家系の中間か、あるいは、いずれかの樹種と同程度の値を示したことが報告されている(滝沢・川口, 1982; 川口・滝沢, 1983; 滝沢ら, 1982)。さらに、繊維傾斜度については、小野寺ら(1977)の報告と異なり、グイマツの方がカラマツより小さく、グイマツ雑種F<sub>1</sub>はその中間的な値を示し、平均繊維傾斜度と最大繊維傾斜度との間に高い正の相関が示されている。また種間雑種の繊維傾斜度は、カラマツ種内交配種に比べて全般に小さくなり、一部の家系で雑種強勢を示し、種間雑種の正逆間に差異が認められることが報告されている。

滝沢ら(1990)、安久津(1996)および安久津ら(1990a, 1990b, 1991, 1993)は、カラマツ類品種の材質諸形質に関する研究を行い、仮道管長の伸長係数から、未成熟材の範囲は品種(カラマツ、グイマツ、それらの種間雑種)に関係なく、髄から12~15年、髄からの距離で4.4~10.2cmであると報告している。またグイマツ雑種F<sub>1</sub>は、カラマツより幹曲りは比較的小さいが、繊維傾斜度では家系間に大きな変異があり、カラマツより大きな値を示した家系があると述べている。さらに曲げ試験と圧縮試験の結果、強度性能の高い順に並べると、グイマツ、グイマツ雑種F<sub>1</sub>、カラマツであることを報告している。

大島・錦織(1994)は、グイマツ雑種F<sub>1</sub>の幹曲りにおける家系間変異を調べ、グイマツ雑種F<sub>1</sub>の幹曲りは、正逆交雑種との間に統計的な有意差が示されず、試験地によりグイマツ、あるいはグイマツとカラマツより少ないと報告している。さらに分散分析から、幹曲りの狭義の遺伝率を0.68~0.70と高い値を推定している。また大島・黒丸(1995a, 1995b)は、グイマツ雑種F<sub>1</sub>の心材色の家系間変異を明らかにし、容積密度数については、種間・種内家系間ともに有意差が認められた。分散分析から、容積密度数の狭義の遺伝率を0.55と推定した。繊維傾斜度では、種間に統計的な有意差はなく、それらの種内の家系間のみに有意差が認められた。分散分析から、繊維傾斜度の狭義の遺伝率を0.57と推定した。容積密度数と繊維傾斜度の育種的な改良には、優良な母樹と花粉親の選抜が重要で、選抜による育種の効果が大きいことを指摘している。

永田・戸巻（1993）および永田ら（1992）は、グイマツ雑種 $F_1$ の優良個体の選抜に当たり、成長の優れた210個体から、平均年輪幅4.2mm、平均容積密度数495kg/m<sup>3</sup>の13個体を高容積密度個体として選抜した。また162個体の繊維傾斜度を調査し、旋回木理の少ない12個体を選抜した。

これらの材質に関する研究の報告から、グイマツ雑種 $F_1$ の幹曲り、容積密度数、繊維傾斜度、心材色などの諸形質は、母樹と花粉親の影響を受ける遺伝性の比較的高い形質であると推察される。容積密度数は、グイマツがカラマツよりも高く、グイマツ雑種 $F_1$ の容積密度数は両親種の中間的な値を示すこと、またグイマツ雑種 $F_1$ の幹曲りは、カラマツよりも少ないという特徴は共通している。しかし繊維傾斜度に関しては、供試した材料により異なる結果が報告されている。倉橋（1988）は、異なる結果が得られている原因について、それぞれの供試木間に個体差があり、また組合せ能力に幅があることを示すものと指摘している。大島・黒丸（1995b）は、少ない組合せ（家系）に基づく報告が多く、一定の傾向が得られていないと指摘している。このため実生の子供家系の研究では、交雑する樹種の変異を明らかにし、供試した母樹と花粉親の変異を把握する必要がある。また、家系間および家系内個体の変動があると推察されるため、家系および家系内の調査対象の数を増加させる必要がある。

カラマツは、木質構造設計規準における木材の許容応力度では、針葉樹Ⅲ類に分類されており、グイマツを含むダフリ系カラマツおよびシベリアカラマツ（高橋ら、1968）と推察されるソ連カラマツはⅠ類に分類されている。カラマツとグイマツは、スギ、エゾマツ、トドマツがⅣ類に分類されていることに比べると、針葉樹構造材として上位にランクされている（日本建築学会、1995）。また、グイマツ雑種 $F_1$ の容積密度数、曲げおよび圧縮に関する強度性能は、グイマツとカラマツの中間的な値を示し（小野寺ら、1977；安久津ら、1990b, 1991, 1993）、グイマツ雑種 $F_1$ はカラマツよりも、容積密度数と強度性能に関する材質が優れていることが知られている。

現在、グイマツ雑種 $F_1$ については、成長、樹形等の観点から2品種が農林水産省の種苗法に基づく品種に登録されており、品種登録制度には、その品種の特性の区別性、均一性、安定性という要件が必要とされている（田之畑、1995）。野ねずみ対策として開発されたグイマツ雑種 $F_1$ は、容積密度数と強度性能がカラマツより高いとみなされているため、その特徴を向上させるとともに、繊維傾斜度が大きいという欠点を育種的に改良することで、優れた材質品種のグイマツ雑種 $F_1$ を開発できることが期待される。

本章では、従来の研究を踏まえて、グイマツ雑種 $F_1$ の材質に関する優良品種を開発するための基礎的な知見を得ることを目的とし、種苗法に基づく品種登録を考慮しながら、調査・研究を進めた。まず第2節では、北海道に植栽されたグイマツとカラマツを含む針葉樹8樹種における容積密度数に関する変動の特徴、そして採種園に植栽されたグイマツとカラマツの容積密度数の遺伝変異について議論した。つぎに第3節では、グイマツとカラマツの種間雑種の特徴を把握するため、若齢の実生家系における成長および材質諸形質について検討した。さらに第4節では、若齢の実生家系について、種間雑種の正逆家系間の関係およびグイマツ雑種 $F_1$ 家系の材質変異を議論した。最後に第5節では、得られた結果に基づき、グイマツ雑種 $F_1$ の材質育種の可能性および方向性を総括した。

## 第2節 グイマツとカラマツの容積密度数の特徴

### 2.1 はじめに

北海道では、郷土樹種の造林が容易ではなかったため、本州のカラマツおよびサハリンや千島列島のグイマツの他に、北海道と同緯度に近い地域に天然分布している多くの外国樹種が積極的に導入されてきた（柳沢、1961, 1963）。導入および交雑育種の成果のひとつが、グイマツおよびカラマツによる種間雑種のグイマツ雑種 $F_1$ である

とされている。

グイマツ雑種F<sub>1</sub>の材質特性を調査するためには、まず、母樹と花粉親であるグイマツとカラマツの樹種としての特徴を把握することが重要である。グイマツ雑種F<sub>1</sub>は、グイマツとカラマツ精英樹クローンから構成されている採種園において、自然交雑によりグイマツ母樹から採取された種子から生産される。このため、採種木になる精英樹クローンの材質特性を明らかにし、それに基づいた採種園の管理が重要になると考えられる。しかし、同一採種園に植栽されたグイマツとカラマツの容積密度数に関する遺伝的要因の寄与の目安になる反復率を推定した報告はない。

本節では、カラマツ属のグイマツとカラマツの樹種としての特徴に関する基礎的知見を得ることを目的として、北海道の同一林地に植栽された針葉樹の容積密度数について、半径方向の変動パターンを比較した。また、採種園に植栽されたグイマツとカラマツの容積密度数に関する反復率を推定し、両樹種に関する遺伝変異を検討した。

## 2.2 材料と方法

### 2.2.1 北海道に植栽された針葉樹における容積密度数の半径方向の変動

北海道旭川市にある外国樹種見本林は、1898年から外国樹種の植栽が始まり、平坦地に樹種ごとに植栽され、林分の管理は被害木、衰弱木を中心とした弱度の間伐のみが行われた（旭川営林支局，1981）。当林分では過密な状態になり、枝の枯れ上りが進行したことから、1998年2月に間伐が行われた。本研究の材料をグイマツ、カラマツおよび外国産樹種を含む8針葉樹の間伐木の中から、樹種ごとに平均的な生育を示していた個体から供試した。カラマツ属（*Larix*）でグイマツ（*L. gmelinii* var. *japonica*）とカラマツ（*L. kaempferi*）、トウヒ属（*Picea*）でアカエゾマツ（*P. glehnii*）、ドイツトウヒ（*P. abies*）、カナダトウヒ（*P. glauca*）、モミ属（*Abies*）でトドマツ（*A. sachalinensis*）、マツ属（*Pinus*）でヨーロッパアカマツ（*P. sylvestris*）とストロブマツ（*P. strobes*）である。樹種毎に4～6個体の41個体について、地上高2.5m、あるいは3.7m部位から厚さ5 cmの円板を採取した。

供試した円板の年輪数、直径と心材幅を測定後、髓を頂点とした扇形試験片（中心角30度）を切り出し、髓から5年輪単位の試験体を作製し、容積密度数と年輪幅を測定した。秤量法により、容積密度数（Bd）（kg/m<sup>3</sup>）を次式により算出した。なお生材体積は、水中浮力法で測定した（加納，1973a）。

$$Bd \text{ (kg/m}^3\text{)} = W_o / V_g \times 1000$$

W<sub>o</sub>：全乾重量（g）、V<sub>g</sub>：生材体積（cm<sup>3</sup>）。

### 2.2.2 グイマツとカラマツ精英樹クローンの容積密度数の遺伝変異

材料としたグイマツおよびカラマツ精英樹クローンを、林木育種センター北海道育種場の平坦地に1958年に設定された採種園から供試した。設定後、39年目の1996年8月に伐採木の地上高4 m部位から厚さ10cmの円板を、グイマツで4クローン、カラマツで5クローンについて、1クローンにつき3個体の計27個体から採取した。なお当採種園では、クローン毎に各個体が単木混交植栽され、着花促進のための樹幹の切断は実施されておらず、また枝に対する人的な行為は行われなかったため、自然落枝にまかされていた。設定後、12年目に本数率で28%および20年目に57%の間伐が行われたため、材料を採取した時点での立木間隔は6.5mであった。

供試した円板の年輪数、直径と心材幅を測定後、髓を頂点とした扇形試験片（中心角30度）を切り出し、髓から5年輪単位の試験体を作製し、容積密度数、年輪幅および晩材率を測定した。容積密度数は前項と同様に測定した。

カラマツ属は早晚材の移行が急激であるため、早材と晩材の色調差が著しいという特徴がある。そのため晩材率の測定は、0.01mm単位のデジタルノギスを用いて、ルーペ下で色調の相違から早材部と晩材部を区分し、5年輪単位の年輪幅と早材幅を測定後、年輪幅と早材幅の差から晩材幅を求め、晩材率(%)を算出した。

## 2.3 結果と考察

### 2.3.1 北海道に植栽された針葉樹における容積密度数の半径方向の変動

供試した林齢43～71年の8樹種についての概要を表2-2-1に示した。地上高2.5m、あるいは3.7mの測定部位における樹種毎の平均年輪数は34～55年輪、心材率で67～87%であった。

表2-2-1 旭川市に設定された外国樹種見本林における供試木の概要

| 樹 種       | 個体数 | 林 齢<br>(年) | 樹 高<br>(m) | 胸高直径<br>(cm) | 測 定 部 位 |     |        |
|-----------|-----|------------|------------|--------------|---------|-----|--------|
|           |     |            |            |              | 地上高(m)  | 年輪数 | 心材率(%) |
| グイマツ      | 5   | 43         | 19         | 19           | 2.5     | 37  | 86     |
| カラマツ      | 5   | 61         | 21         | 23           | 2.5     | 42  | 83     |
| アカエゾマツ    | 5   | 48         | 15         | 19           | 3.7     | 34  | 69     |
| トドマツ      | 4   | 71         | 21         | 25           | 3.7     | 50  | 87     |
| ドイツトウヒ    | 5   | 70         | 22         | 24           | 3.7     | 55  | 85     |
| カナダトウヒ    | 6   | 64         | 17         | 18           | 2.5     | 40  | 82     |
| ヨーロッパアカマツ | 5   | 61         | 21         | 27           | 2.5     | 43  | 67     |
| ストロブマツ    | 6   | 61         | 21         | 31           | 3.7     | 43  | 86     |

8樹種の容積密度数および年輪幅の髄から35年輪までの半径方向の変動を、図2-2-1に示した。供試個体の測定部位は枝下材であるため、地上高2.5mと3.7m部位における容積密度数の差異は少ないと推察される。木材の密度の変動は、主として木材の構造の差異と抽出成分の存在によっておこる(渡辺, 1978)。測定部位には心材が多く含まれており、カラマツ属、トウヒ属およびマツ属では正常樹脂道(島地, 1964)が存在し、さらにカラマツ属およびマツ属では、有色心材であるため、容積密度数が過大に評価される危険性がある。このため、正確な容積密度数の測定には抽出成分を除去する必要があるが、本調査では、抽出成分を含む容積密度数を測定した。

樹種毎に半径方向の容積密度数の変動をみると、グイマツ、カラマツおよびヨーロッパアカマツは類似した変動パターンを示し、髄から20～25年輪までは比較的急激に増加するが、その後の変動は少なくなる傾向を示した。トウヒ属のアカエゾマツ、ドイツトウヒ、カナダトウヒおよびモミ属のトドマツは、髄から20年輪までは比較的変動が少なく、その後ゆるやかに増加する傾向を示したが、カナダトウヒでは25年輪を境に減少した。ストロブマツでは、容積密度数は270～300kg/m<sup>3</sup>の範囲で変動が少ない傾向を示した。

一般に、多くの針葉樹材では樹心部の密度が低く、外周に向かって増加し、やがて安定する形をとるが、スギ、ヒノキでは樹心部が高く、10～15年の間に減少し、その後安定する形をとり、またマツ類では樹心より数年輪で減少し、最小値をとった後、10～15年輪で急増し、その後安定すると言われている(木方, 1985)。本研究ではグイマツ、カラマツおよびヨーロッパアカマツがマツ類に、アカエゾマツ、ドイツトウヒおよびカナダトウヒがスギ、ヒノキに類似したパターンを示した。

容積密度数では、髄から6～10年輪と25～30年輪部位における樹種ごとの順位は、ほぼ同じであった。容積密度数の高い順に並べると、グイマツ、カラマツ、ドイツトウヒ、ヨーロッパアカマツ、カナダトウヒ、アカエゾマツ、トドマツ、ストロブマツである。グイマツは、いずれの測定部位においても容積密度数が400kg/m<sup>3</sup>以上の高

い値を示した。カラマツは、11 - 15 年輪以降で容積密度数が  $400\text{kg/m}^3$  以上の値を示した。

年輪幅の髄から 35 年輪までの半径方向の変動を図 2-2-2 に示した。トドマツとカナダトウヒでは、髄から 6 - 10 年輪において年輪幅はわずかに増加する傾向を示したが、全ての樹種の年輪幅は 11 年輪以降は減少する傾向を示した。ストロブマツは、いずれの測定部位においても年輪幅が最も広い値を示した。グイマツおよびカラマツは、髄から 10 年輪までの平均年輪幅がグイマツで  $4.5\text{mm}$ 、カラマツで  $4.7\text{mm}$  を示した。全ての樹種で 21 年輪以降は  $2\text{mm}$  以下になり、26 年輪以降ではストロブマツを除く全ての樹種で、 $1.5\text{mm}$  以下で推移した。

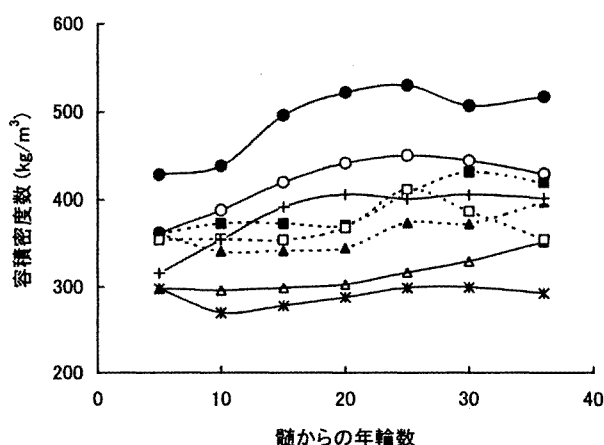


図 2-2-1 容積密度数の半径方向の変動

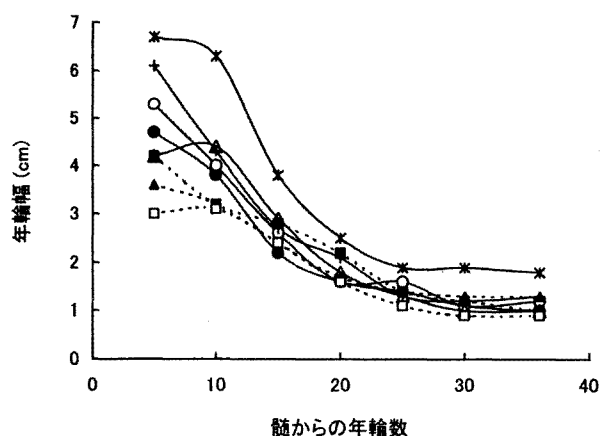


図 2-2-2 年輪幅の半径方向の変動

—●— グイマツ —○— カラマツ --▲-- アカエゾマツ  
—△— トドマツ --■-- ドイツトウヒ --□-- カナダトウヒ  
—+— ヨーロッパアカマツ —\*— ストロブマツ

—●— グイマツ —○— カラマツ --▲-- アカエゾマツ  
—△— トドマツ --■-- ドイツトウヒ --□-- カナダトウヒ  
—+— ヨーロッパアカマツ —\*— ストロブマツ

つぎに、グイマツとカラマツおよび北海道の郷土樹種であるアカエゾマツとトドマツについて、髄周辺の 5 年輪以内の容積密度数を 100 として、指数表示した場合の容積密度数の半径方向の変動を調べ、その結果を図 2-2-3 に示した。グイマツおよびカラマツは、アカエゾマツおよびトドマツと異なり、年輪数の増加に従い、容積密度数は急激に増加し、その変動パターンは凸型を示した。指数をみると、11 - 15 年輪部位で 115 以上を示し、21 - 25 年輪部位でグイマツが 124、カラマツが 125 と最も高い値を示し、31 - 35 年輪部位で 120 前後に減少した。アカエゾマツの指数は、髄周辺が高く、それ以降減少し、21 年輪以降増加する傾向を示した。トドマツでは、21 年輪以降増加する傾向を示した。

またグイマツとカラマツについて、髄から 15 年輪以内を樹心部とし、それ以降を辺縁部として、それらの容積密度数の関係を図 2-2-4 に示した。安久津ら (1990a, 1991) は、グイマツとカラマツの未成熟材の範囲を髄から 12 - 15 年輪と推定している。従って、樹心部は主に未成熟材で、辺縁部は主に成熟材に相当する部位であると推察される。両部位の間に、相関係数が 0.954 の有意な正の相関 ( $p < 0.01$ ) が示されたため、樹心部の容積密度数から、その個体の容積密度数を比較的早期に評価できる可能性が示唆される。

本調査における針葉樹 8 樹種の中で、容積密度数についてはグイマツが最も高く、次にカラマツが高い値を示した。従って、それらの種間雑種については、容積密度数が高いことが推察され、また容積密度数は強度的性質と高い相関があるので、北海道における林木育種の対象樹種としての可能性が期待される。

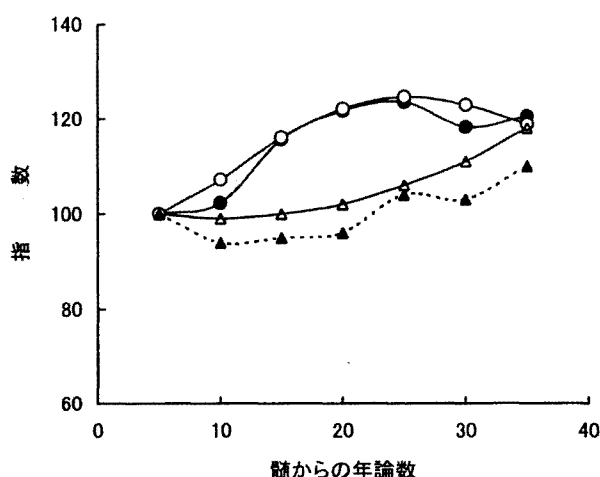


図 2-2-3 指数表示した容積密度の半径方向の変動

—●— グイマツ                      —○— カラマツ  
 ---▲--- アカエゾマツ              —△— トドマツ

### 2.3.2 グイマツとカラマツ精英樹クローンの容積密度数の遺伝変異

林齢39年生の地上高4m部位における各形質の樹心・辺縁部ごとの平均値を表2-2-2に示した。髄から15年輪以内を樹心部とし、それ以降を辺縁部とした。樹心部は主に未成熟材で、辺縁部は主に成熟材に相当する部位であると推察される。グイマツの直径は16.8～22.3cm、カラマツの直径は21.0～24.3cmで、グイマツの根室8の直径が、特に小さい値を示した。心材率、年輪数および心材年輪数の平均値では、グイマツとカラマツに大きな差が見られなかった。またグイマツは、カラマツと比べて、容積密度数と晩材率で高い傾向を示した。

表 2-2-2 採種園における供試クローンの概要および各形質の樹心・辺縁部ごとの測定結果

| 樹 種  | クローン名  | 直径<br>(cm) | 心材率<br>(%) | 年 輪 数 |     | 容 積 密 度 数 (kg/m <sup>3</sup> ) |       |       | 年 輪 幅 (mm) |       |       | 晩 材 率 (%) |       |       |
|------|--------|------------|------------|-------|-----|--------------------------------|-------|-------|------------|-------|-------|-----------|-------|-------|
|      |        |            |            | 全 体   | 心 材 | 全 体                            | 樹 心 部 | 辺 縁 部 | 全 体        | 樹 心 部 | 辺 縁 部 | 全 体       | 樹 心 部 | 辺 縁 部 |
| グイマツ | 稚 内 1  | 21.3       | 82         | 31    | 21  | 564                            | 560   | 566   | 3.2        | 4.4   | 2.1   | 34        | 32    | 35    |
|      | 稚 内 8  | 19.8       | 73         | 30    | 18  | 526                            | 512   | 526   | 3.0        | 3.8   | 2.1   | 35        | 32    | 38    |
|      | 根 室 8  | 16.8       | 66         | 25    | 14  | 470                            | 449   | 481   | 3.0        | 3.4   | 2.2   | 28        | 26    | 33    |
|      | 札 幌 9  | 22.3       | 76         | 31    | 19  | 499                            | 453   | 517   | 3.3        | 3.9   | 2.8   | 29        | 26    | 31    |
|      | 平 均    | 20.1       | 74         | 29    | 18  | 515                            | 494   | 523   | 3.1        | 3.9   | 2.3   | 32        | 29    | 34    |
| カラマツ | 十 勝 4  | 24.3       | 74         | 31    | 21  | 448                            | 416   | 461   | 3.5        | 4.4   | 3.4   | 26        | 24    | 28    |
|      | 十 勝 5  | 24.0       | 70         | 30    | 17  | 421                            | 400   | 434   | 3.9        | 4.6   | 2.2   | 27        | 26    | 27    |
|      | 空 知 1  | 21.0       | 74         | 30    | 20  | 419                            | 397   | 430   | 3.4        | 4.6   | 2.5   | 26        | 25    | 26    |
|      | 定山溪 14 | 22.5       | 78         | 30    | 21  | 415                            | 401   | 427   | 3.6        | 3.7   | 2.7   | 25        | 25    | 25    |
|      | 定山溪 16 | 22.0       | 69         | 30    | 19  | 472                            | 446   | 484   | 3.2        | 4.1   | 3.1   | 29        | 28    | 29    |
|      | 平 均    | 22.8       | 73         | 30    | 20  | 435                            | 412   | 447   | 3.5        | 4.3   | 2.8   | 27        | 26    | 27    |

各項目の数値は、材料を採取した地上高4m部位の平均値を示す。  
 樹心部は髄から15年輪以内の部位、辺縁部は髄から16年輪以降の部位を示す。

容積密度数と年輪幅の半径方向の変動を図2-2-5に示した。両樹種の容積密度数については、髄周辺が最も低く、16-20年輪部位で最も高く、グイマツで $547\text{kg/m}^3$ 、カラマツで $478\text{kg/m}^3$ を示し、それ以降は減少する傾向を示した。年輪幅は、髄周辺(1-10年輪)が最も広く、それ以降では減少する傾向を示し、平均の年輪幅はグイマツで $3.1\text{mm}$ 、カラマツで $3.5\text{mm}$ を示した。

容積密度数、年輪幅および晩材率について、クローンを要因とした分散分析の結果を表2-2-3に示した。両樹種の容積密度数は、全ての測定部位でクローン間に有意差が認められた。年輪幅は両樹種で有意差が認められた測定部位は少なく、晩材率では、グイマツは測定部位の1部位(6-10年輪)で有意差が示されなかったが、カラマツでは年輪幅と同様に有意差が示された測定部位が1部位(11-15年輪)であった。髄からの年輪数15年で区分した樹心部と辺縁部に関する分散分析の結果および反復率、また反復率の計算例を表2-2-4に示した。両樹種の容積密度数は、樹心部と辺縁部ともにクローン間に有意差が認められた。年輪幅は両樹種の両部位ともに有意差が認められず、晩材率では、グイマツは両部位とも有意差が認められたが、カラマツでは有意差が認められなかった。反復率は、グイマツは容積密度数が最も高く、樹心部で0.80、辺縁部で0.87を示した。年輪幅の反復率はそれぞれ0.39と0.38、晩材率はそれぞれ0.59と0.65であった。カラマツの反復率については、容積密度数が最も高く、樹心部で0.51、辺縁部で0.56であったが、年輪幅はそれぞれ0.30と0.26、および晩材率は、それぞれ0.29と0.28の低い値を示した。カラマツの容積密度数の反復率では0.75-0.85と高い値が報告されており(織田, 1985)、研究材料により反復率は変動することが示唆される。またカラマツの曲げヤング係数は、クローン間に有意差が認められ、試験地間の相関も大きいと報告されている(高田, 1994)。

グイマツとカラマツの容積密度数は、年輪幅および晩材率に比べて、反復率が高く、また辺縁部は樹心部より反復率が高い傾向を示した。年輪幅に影響される晩材率の反復率は、容積密度数と年輪幅の間、あるいは年輪幅に近い反復率を示した。従って容積密度数は、他の形質に比べて遺伝力が高く、育種による高い遺伝獲得量が期待される。

次に、グイマツとカラマツを併せた9クローンにおける形質間の相関係数を求め、その結果を表2-2-5に示した。早期の材質評価が可能であるかを検討するため、樹心部と辺縁部の関係を図2-2-6に示した。容積密度数および晩材率は、樹心部と辺縁部との間に有意な正の相関( $p < 0.01$ )を示したが、年輪幅では相関が見られなかった。また、容積密度数と晩材率の間に、樹心部と辺縁部ともに有意な正の相関( $p < 0.01$ )が示された。

北海道産のカラマツについては、若齢材部の位置において旺盛な成長を示すが、後に急激に低下する。髄周辺では年輪幅が5-10mmであるが、20-30年を過ぎる頃から急に狭くなり、2mm前後になることが多いと報告されている(石田・小野寺, 1969)。また千葉ら(1980)は、容積密度数は晩材率との間に有意な正の相関( $p < 0.01$ )を示すが、年輪幅との間では相関が無いことを報告している。野堀ら(1988)は、1年輪の平均容積密度に関与する構造因子は、晩材率、早材部容積密度、晩材部容積密度の順となり、特に晩材率の影響が大きいことを指摘している。深沢・川辺(1972)および安久津ら(1991)は、グイマツとカラマツともに、容積密度数と晩材率との間に有意な正の相関があることを報告している。

本研究において、グイマツとカラマツともに髄周辺では年輪幅が広いが、年輪数が増加するに従い減少する傾向を示した。グイマツはカラマツに比べて、容積密度数および晩材率で高い値を示した。両樹種の容積密度数は、年輪幅および晩材率に比べて反復率が高く、遺伝性のある形質であることが示唆される。また、容積密度数と晩材率との間に有意な正の相関が示され、両形質ともに樹心部と辺縁部との間に有意な相関が示されたことから、比較的早期に検定できる可能性が推察される。

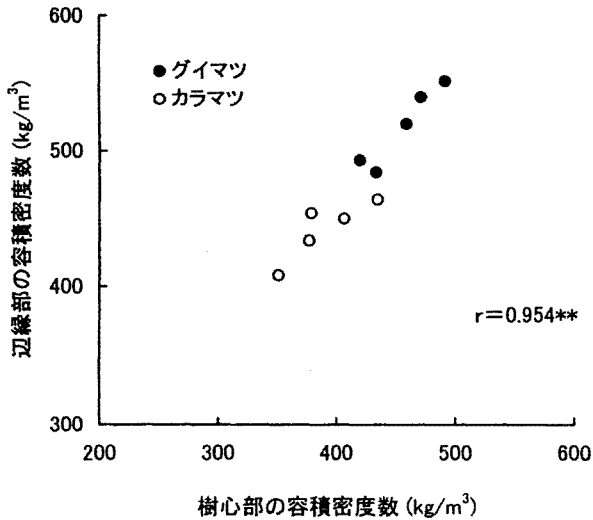


図 2-2-4 樹心部および辺縁部の容積密度数の関係

樹心部：髄から 15 年輪以内の部位、辺縁部：髄から 16 年輪以降の部位。

\*\* 危険率 1% 水準で有意。

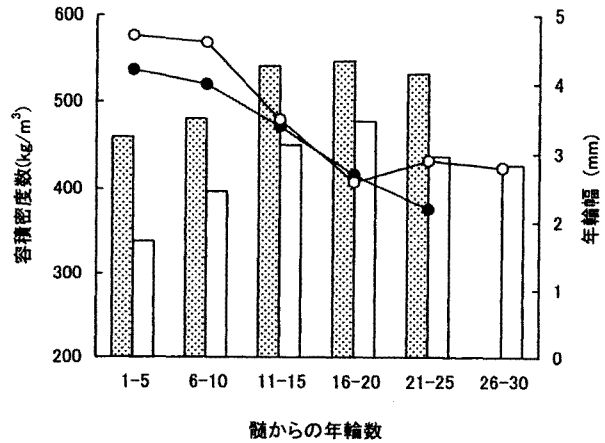


図 2-2-5 容積密度数および年輪幅の半径方向の変動

容積密度数：▨ゲイマツ □カラマツ

年輪幅：●ゲイマツ ○カラマツ

表 2-2-3 ゲイマツおよびカラマツの各形質の分散分析結果

| 樹種   | 形質    | 測定部位<br>(髄からの年輪数) | 自由度  |      | 平均平方      |         | 分散比        |
|------|-------|-------------------|------|------|-----------|---------|------------|
|      |       |                   | クロン間 | クロン内 | クロン間      | クロン内    |            |
| ゲイマツ | 容積密度数 | 1-5               | 3    | 8    | 8482.972  | 536.917 | 15.799 **  |
|      |       | 6-10              | 3    | 8    | 8109.639  | 330.250 | 24.556 **  |
|      |       | 11-15             | 3    | 8    | 9902.778  | 431.417 | 22.954 **  |
|      |       | 16-20             | 3    | 8    | 17036.970 | 324.250 | 52.543 **  |
|      |       | 21-               | 3    | 8    | 1721.046  | 281.476 | 6.108 *    |
|      | 年輪幅   | 1-5               | 3    | 8    | 0.068     | 1.346   | 0.050 n.s. |
|      |       | 6-10              | 3    | 8    | 0.743     | 0.223   | 3.328 n.s. |
|      |       | 11-15             | 3    | 8    | 2.365     | 0.288   | 8.203 **   |
|      |       | 16-20             | 3    | 8    | 1.848     | 0.155   | 11.919 **  |
|      |       | 21-               | 3    | 8    | 0.092     | 0.125   | 0.737 n.s. |
|      | 晩材率   | 1-5               | 3    | 8    | 34.306    | 2.500   | 13.722 **  |
|      |       | 6-10              | 3    | 8    | 24.972    | 2.171   | 4.07 n.s.  |
|      |       | 11-15             | 3    | 8    | 69.417    | 9.333   | 7.438 *    |
|      |       | 16-20             | 3    | 8    | 152.750   | 21.083  | 7.245 *    |
|      |       | 21-               | 3    | 8    | 38.904    | 6.262   | 6.213 *    |
| カラマツ | 容積密度数 | 1-5               | 4    | 10   | 2043.433  | 396.067 | 5.159 *    |
|      |       | 6-10              | 4    | 10   | 856.433   | 237.800 | 3.478 *    |
|      |       | 11-15             | 4    | 10   | 1455.101  | 338.040 | 4.305 *    |
|      |       | 16-20             | 4    | 10   | 2574.067  | 522.067 | 4.931 *    |
|      |       | 21-25             | 4    | 10   | 1775.667  | 502.067 | 3.537 *    |
|      | 年輪幅   | 26-               | 4    | 10   | 1958.404  | 401.533 | 4.877 *    |
|      |       | 1-5               | 4    | 10   | 0.984     | 1.197   | 0.823 n.s. |
|      |       | 6-10              | 4    | 10   | 1.152     | 0.268   | 4.300 *    |
|      |       | 11-15             | 4    | 10   | 0.754     | 0.381   | 1.982 n.s. |
|      |       | 16-20             | 4    | 10   | 0.953     | 0.452   | 2.109 n.s. |
|      |       | 21-25             | 4    | 10   | 0.534     | 0.186   | 2.871 n.s. |
|      |       | 26-               | 4    | 10   | 0.546     | 0.276   | 1.978 n.s. |
|      | 晩材率   | 1-5               | 4    | 10   | 11.933    | 9.667   | 1.234 n.s. |
|      |       | 6-10              | 4    | 10   | 4.767     | 2.067   | 2.306 n.s. |
|      |       | 11-15             | 4    | 10   | 8.067     | 2.133   | 3.781 *    |
|      |       | 16-20             | 4    | 10   | 3.233     | 4.467   | 0.724 n.s. |
|      |       | 21-25             | 4    | 10   | 13.833    | 9.201   | 1.504 n.s. |
|      |       | 26-               | 4    | 10   | 22.833    | 7.404   | 3.086 n.s. |

\*\*：危険率1%水準で有意，\*：危険率5%水準で有意，n.s.：非有意。

表2-2-4 グイマツおよびカラマツの樹心部、辺縁部別の各形質の分散分析結果  
および反復率

| 樹種   | 部位<br>形質 | 自由度   |       | 平均平方     |         | 分散比       | 反復率  |
|------|----------|-------|-------|----------|---------|-----------|------|
|      |          | クローン間 | クローン内 | クローン間    | クローン内   |           |      |
| グイマツ | 樹心部      |       |       |          |         |           |      |
|      | 容積密度数    | 3     | 8     | 2510.082 | 193.083 | 13.000 ** | 0.80 |
|      | 年輪幅      | 3     | 8     | 0.887    | 0.304   | 2.918 n.s | 0.39 |
|      | 晩材率      | 3     | 8     | 9.746    | 1.833   | 5.317 *   | 0.59 |
|      | 辺縁部      |       |       |          |         |           |      |
|      | 容積密度数    | 3     | 8     | 4194.307 | 199.000 | 21.077 ** | 0.87 |
| カラマツ | 樹心部      |       |       |          |         |           |      |
|      | 容積密度数    | 4     | 10    | 536.195  | 130.067 | 4.122 *   | 0.51 |
|      | 年輪幅      | 4     | 10    | 0.830    | 0.363   | 2.287 n.s | 0.30 |
|      | 晩材率      | 4     | 10    | 5.045    | 2.267   | 2.225 n.s | 0.29 |
|      | 辺縁部      |       |       |          |         |           |      |
|      | 容積密度数    | 4     | 10    | 1621.554 | 336.533 | 4.818 *   | 0.56 |
|      | 年輪幅      | 4     | 10    | 0.398    | 0.194   | 2.052 n.s | 0.26 |
|      | 晩材率      | 4     | 10    | 9.533    | 4.400   | 2.167 n.s | 0.28 |

\*\*:危険率1%水準で有意, \*:危険率5%水準で有意, n.s:非有意。

樹心部は髄から15年輪以内の部位, 辺縁部は髄から16年輪以降の部位を示す。

## 〈反復率の計算例〉

グイマツ樹心部の容積密度数の場合: 反復率 0.80

$$\text{反復率} = \sigma_e^2 / (\sigma_e^2 + \sigma_\mu^2)$$

クローン間の平均平方の期待成分は  $\sigma_e^2 + k_e \sigma_\mu^2$  である。 $\sigma_e^2$ : クローン間分散,  $\sigma_\mu^2$ : 誤差分散(クローン内個体分散),  $k_e$ : クローン毎のデータ数代表値クローン間の平均平方の期待成分:  $\sigma_e^2 + k_e \sigma_\mu^2 = 2510.082$  $\sigma_e^2 = 193.083$ ,  $k_e = 3$ (本)から,  $\sigma_\mu^2 = 772.333$ 従って, 反復率  $= \sigma_e^2 / (\sigma_e^2 + \sigma_\mu^2) = 772.333 / (772.333 + 193.083) = 0.80$ 。

表 2-2-5 容積密度数, 年輪幅および晩材率の間の相関係数

| 形質       | 樹心部    |        |       | 辺縁部    |        |       |
|----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
|          | 容積密度数  | 年輪幅    | 晩材率   | 容積密度数  | 年輪幅    | 晩材率   |
| 樹心部容積密度数 | 1.000  |        |       |        |        |       |
| 年輪幅      | -0.145 | 1.000  |       |        |        |       |
| 晩材率      | 0.914  | -0.069 | 1.000 |        |        |       |
| 辺縁部容積密度数 | 0.958  |        |       | 1.000  |        |       |
| 年輪幅      |        | 0.119  |       | -0.326 | 1.000  |       |
| 晩材率      |        |        | 0.832 | 0.877  | -0.513 | 1.000 |

供試クローン数: 9。

樹心部は髄から15年輪以内の部位, 辺縁部は髄から16年輪以降の部位を示す。

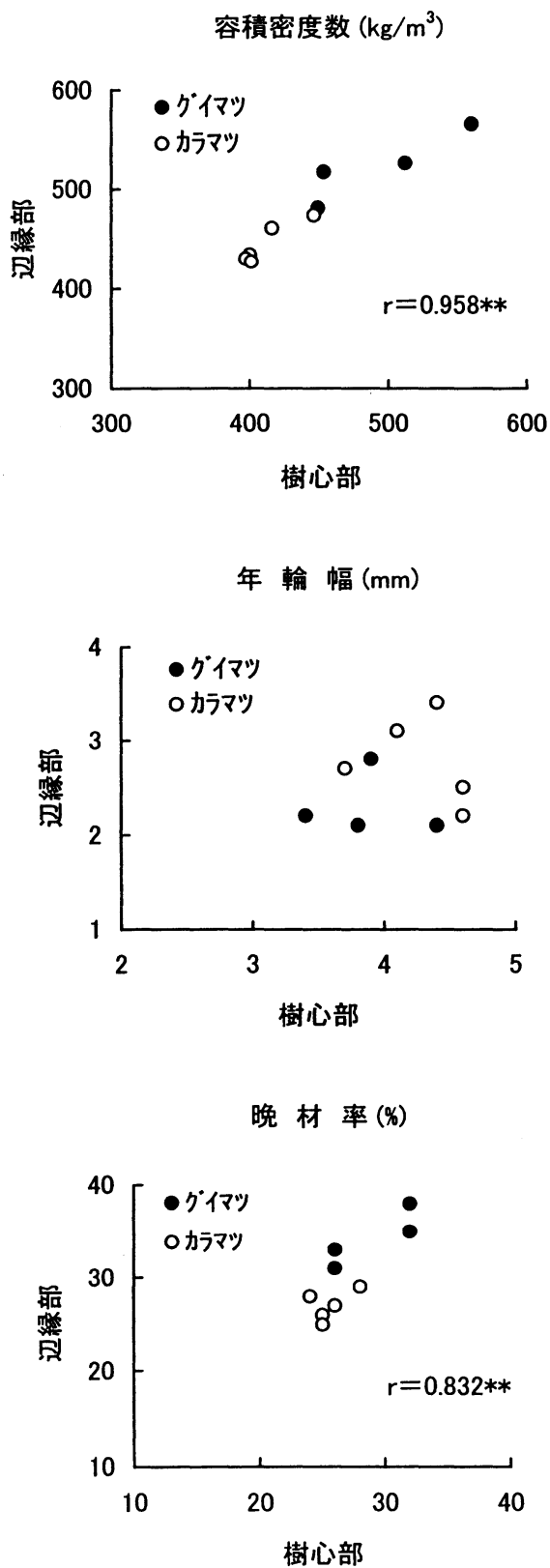


図 2-2-6 樹心部と辺縁部における容積密度数、年輪幅、晩材率の関係

\*\* : 危険率 1 % 水準で有意。

## 2.4 要 旨

グイマツとカラマツの容積密度数に関する特徴を検討するため、外国樹種見本林に植栽された針葉樹8樹種および採種園に植栽されたグイマツとカラマツの容積密度数のクローン変異を調べた。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 本調査の針葉樹8樹種の中で、グイマツ、カラマツの順で容積密度数が高い値を示した。半径方向の変動において、両樹種の容積密度数は、髄周辺が最も低く、21年輪以降で最高の値を示し、その後、減少する傾向を示した。年輪幅は、髄周辺が最も広く、年輪数の増加に従い減少する傾向を示した。
- (2) 容積密度数と晩材率との間に、有意な正の相関が示された。また両形質ともに、樹心部と辺縁部との間に有意な正の相関が示されたため、早期に検定できる形質であると推察された。
- (3) グイマツとカラマツの容積密度数は樹心部と辺縁部ともに、年輪幅および晩材率に比べて高い反復率を示した。従って、両樹種の容積密度数は再現性があり、遺伝性が高いと考えられ、育種的な改良効果がある形質と示唆された。
- (4) これらの結果から、種間雑種の交雑親（母樹および花粉親）であるグイマツとカラマツの容積密度数は、比較的高いと推察され、また容積密度数の反復率が高いため、育種的な改良効果の可能性が考えられる。さらに種間雑種の容積密度数の場合、樹心部で高い値を示すものは辺縁部においても高い値を示すことが推察され、比較的早期に相対的な評価ができると期待される。

## 第3節 グイマツとカラマツの種内および種間雑種の成長、材質諸形質の特徴

### 3.1 はじめに

前述したように、カラマツ造林の重大な阻害要因のひとつは、野ねずみによる食害である。グイマツとカラマツの種間雑種作出の目的は、当初、野ねずみに食害され難いカラマツ品種の開発であった。今日では、グイマツが母樹でカラマツが花粉親のグイマツ雑種F<sub>1</sub>は、初期成長が良好で、幹曲りが少ないことが知られていた。しかし従来の種間雑種に関する研究では、少ない組合せ（家系）に基づく報告が多く、一定の傾向が得られていないことが指摘されており（大島・黒丸, 1995b）、また、実生の子供家系間の変異を明らかにするためには、家系毎の調査個体数を多くする必要がある。

前節で、種間雑種の両親であるグイマツとカラマツの容積密度数と晩材率について、樹心部と辺縁部との間に高い相関が得られており、比較的早期に相対的な評価ができることが示唆された。

本節では、若齢のグイマツとカラマツ精英樹クローンをを用いた人工交雑で得た種内および種間雑種の子供家系について、林齢5年の成長に関する調査、そして林齢9年については、間伐した全ての個体を供試して、交雑組合せごとの成長、根元曲り、幹曲り、材質諸形質に関する特徴を検討した。

### 3.2 材料と方法

#### 3.2.1 材料

本研究の材料は、グイマツ3精英樹クローン、カラマツ4精英樹クローンから、人工交雑で得られた種内および種間雑種の子供家系である（河野ら, 1988）。調査した交雑組合せ毎の家系数および交雑組合せの内訳を、表2-3-1に示した。それぞれの交雑組合せの略号を以下のとおりとする。

表 2-3-1 供試した交雑組合せ毎の家系数

| 交雑組合せ       |     |    | 試 験 地 |     |
|-------------|-----|----|-------|-----|
| 母樹          | 花粉親 | 略号 | 育種場   | 釧 路 |
| グイマツ × カラマツ | GL  |    | 11    | 10  |
| カラマツ × グイマツ | LG  |    | 9     | 6   |
| カラマツ × カラマツ | LL  |    | 8     | 7   |
| グイマツ × グイマツ | GG  |    | 6     | 4   |

育種場は、林木育種センター北海道育種場試験地  
(以下「育種場」とする)。

釧路試験地の全家系は、育種場試験地の家系と  
共通している。

## 《 交雑組合せの内訳 》

|     |    | 花 粉 親 |    |    |    | 親  |    |    |
|-----|----|-------|----|----|----|----|----|----|
|     |    | L1    | L2 | L3 | L4 | G1 | G2 | G3 |
| 母 樹 | G1 | ◎     | ◎  | ◎  | ×  | -  | ◎  | ◎  |
|     | G2 | ◎     | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | -  | ◎  |
|     | G3 | ○     | ◎  | ◎  | ◎  | ○  | ○  | -  |
|     | L1 | -     | ◎  | ◎  | ○  | ◎  | ◎  | ◎  |
|     | L2 | ◎     | -  | ◎  | ×  | ○  | ○  | ○  |
|     | L3 | ◎     | ◎  | -  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  |

注1: G1:中標津 4, G2:川 北 4, G3:留 萌 1

L1:諏 訪16, L2:諏 訪14, L3:遠 野 1, L4:十 勝43

注2:行は母樹家系, 列は花粉親家系を示す。

注3:◎:育種場試験地と釧路試験地の共通家系。

○:育種場試験地のみ家系。

×:未交雑のため, 家系が現存しない。

-:自家受粉家系のため, 調査対象から除外した。

グイマツ×カラマツ:GL,

カラマツ×グイマツ:LG,

カラマツ×カラマツ:LL,

グイマツ×グイマツ:GG。

### 3.2.2 成長調査

#### 3.2.2.1 林木育種センター北海道育種場試験地

材料のグイマツとカラマツの種内および種間雑種を林木育種センター北海道育種場の苗畑で2年間育成し, 1989年5月に育種場の平坦な試験地に植栽した。1家系5個体を1プロットとして, それぞれの家系のプロットを試験地にランダムに配置した。1家系につき, 7~8プロット, 35~40個体を植栽した。

林齢5年の1993年に, 全ての植栽木を対象に樹高をcm単位で調査し, 自家受粉家系を分析から除外した。調査した交雑組合せは表2-3-1に示したとおり, GLで11家系, LGで9家系, LLで8家系およびGGで6家系である。

#### 3.2.2.2 釧路試験地

グイマツとカラマツの種内および種間雑種を北海道育種場で3年間養苗後, 1990年に釧路営林署83林班(鶴居村)の緩傾斜地に3反復の乱塊法で試験地を設定した。植栽は, 1プロットにつき30個体の2条植栽である。調査は,

林齢5年の1994年に行われた。調査項目は、樹高と生存率とした。全ての生存木を対象とした樹高はcm単位で測定し、生存率は全ての植栽本数に対する生存本数の比率で表した。調査した交雑組合せは表2-3-1に示したとおり、GLで10家系、LGで6家系、LLで7家系およびGGで4家系である。

### 3.2.3 材質調査

材料は、林木育種センター北海道育種場の試験地に植栽された種内および種間雑種である。植栽後9年（播種後11年）の1997年10月に、GL、LGおよびLLを対象に調査した。家系単位のプロットの5個体について、1個体あるいは連続しない2個体を間伐し、全ての間伐個体を供試した。平均年輪数は7年輪であったため、材料は未成熟材である。なお、GGは成長が遅いため、間伐を行わなかった。なお、調査した交雑組合せは表2-3-1に示したとおり、GLで11家系、LGで9家系、LLで8家系およびGGで6家系である。

調査は、樹高、胸高直径、根元曲り、幹曲り、胸高部位の容積密度数と繊維傾斜度、生材丸太の動的ヤング係数の7項目である。

#### 3.2.3.1 成長、根元曲りおよび幹曲りの測定

伐採した材料の樹高を測定し、根元曲りの測定用に地上高10～100cm間の90cmの丸太に、幹曲り測定用に1～3m間の材長2mの丸太にそれぞれ採材した。

曲りの測定は、素材の日本農林規格第14条の曲りの測定に準じて行った（北海道林産物検査会，1987）。曲りの程度は次式により計算した。

$$\text{曲り}(\%) = \text{丸太の最大矢高} / \text{丸太の末口径} \times 100,$$

丸太の径は、根元曲りで地上高1m部位の直径、幹曲りで地上高3m部位の直径である。

#### 3.2.3.2 材質諸形質の測定

幹曲りを測定した材長2mについて、生材丸太の動的ヤング係数を測定した。動的ヤング係数は、丸太の一端をプラスチックハンマーで打撃し、他端で打撃音をマイクロフォンで収録し、打撃音の一次の固有振動数から算出した。生材丸太の密度は、平均断面式により、丸太の元口径と末口径から求めた丸太の平均径と生材丸太重量から求めた。FFTアナライザー（小野測器CF-1200）を用いて求めた一次の固有振動数から、動的ヤング係数（Ed）を次式により求めた。

$$E_d = (2fL)^2 \times \rho / g$$

Ed：動的ヤング係数（tf/cm<sup>2</sup>），f：一次固有振動数（Hz），L：材長（cm）， $\rho$ ：生材丸太の密度（g/cm<sup>3</sup>），g：重力加速度（980cm/s<sup>2</sup>）。

次に、胸高部位から厚さ5cmの円板を採取し、直径を測定後、髄を頂点とした扇形試験片（中心角30度）を切り出し、容積密度数と年輪幅を測定した。容積密度数は、前述した方法（第2章第2節2.2）と同様に秤量法で測定した。

また繊維傾斜度は、加納（1973b）に準じて割裂法で測定した。地上高100～120cmの間から厚さ20cmの円板を採取し、節枝を避けるように円板の試験体を作製した。試験体の元口と末口に髄を通る平行な基準線を設けて、末口の基準線にナタを用いて加撃割裂し、元口の基準線より割裂線までの距離を測定後、円板の厚さから振れの程度

を測定した。繊維傾斜度は、基準線から最もずれた量と円板の厚さからねじれ角を求め、角度で表示した。

### 3.3 結果と考察

#### 3.3.1 成長の特徴

北海道育種場の試験場および釧路試験地における調査対象としたグイマツとカラマツの種内 (GG, LL) および種間雑種 (GL, LG) の家系数は、表 2-3-1 のとおりである。釧路試験地の全ての家系は、北海道育種場の試験場の家系と共通している。

当試験地では、野ねずみの食害を恒常的に受けていた。特に、1993年度の北海道における野ねずみの森林被害区域面積の79%に当たる2,134haは、野ねずみが異常発生した鶴居村、標茶町などの釧路支庁管内に集中し、試験地が設定されている鶴居村に隣接した標茶町では、全国で初めて野ねずみでの指定被害造林の指定を受けた (阿部, 1996)。このため、試験地では、枯損木のほとんどは、野ねずみによる被害が原因であると考えられる。

釧路試験地における組合せ毎の生存率を、図 2-3-1 に示した。生存本数には、樹幹に野ねずみの食害を受けた個体も含まれる。野ねずみの食害を恒常的に受けていることから、枯損は野ねずみによる被害と推察されるため、生存率の高い家系は野ねずみに食害され難いと判断される。生存率は GL で 42%, LG で 31%, GG で 51% であった。GL においては、生存率が 6~90% と家系間に大きなバラツキを示した。LL では、ほとんど生存している個体が見られなかったが、これは野ねずみの食害が原因と考えられる。岩見沢のカラマツ類の試験地においても、生存率の低い順に並べると LL, LG, GL, GG (飯塚ら, 1993) になり、釧路試験地と同様な傾向を示した。千葉・永田 (1976) が行ったグイマツとカラマツの種内および種間雑種に対する野ねずみの食害に関する室内試験においても、同様な傾向の結果を示した。なお、北海道育種場の試験地では毎年草刈りを行っており、野ねずみの生息できる環境が少ないため、食害を受ける個体がほとんど観察されなかった。

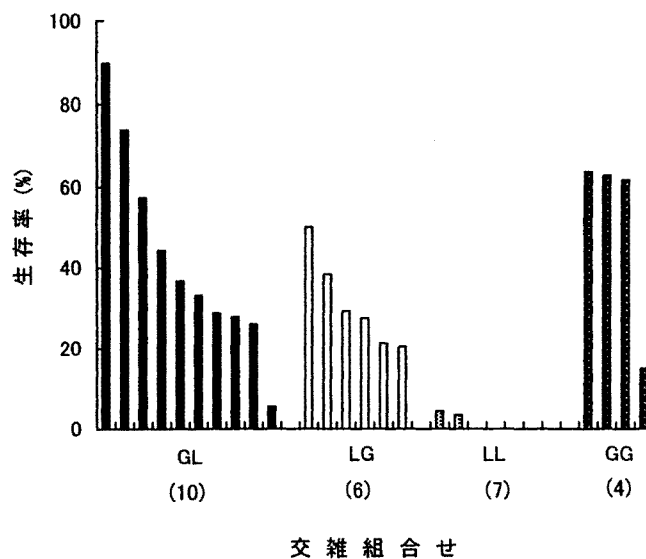


図 2-3-1 釧路試験地における交雑組合せ毎の生存率

交雑組合せの略号は、表 2-3-1 参照。

交雑組合せの下の ( ) は、それぞれの家系数。

北海道育種場の試験地に植栽されている交雑家系の枝を供試して、野ねずみに食害させる室内試験において、GLはLLより食害され難く、家系間に有意差を示したことが報告されている（飯塚ら，1994a）。また、野ねずみの嗜好性と樹皮の各種成分の関係について報告がされており、野ねずみの嗜好性と樹皮に含まれる粗樹脂や粗タンニンに関係があることが示唆されている（高橋ら，1966）。北海道育種場の試験地に植栽されている交雑家系の枝の樹皮のエーテル抽出量率（％） $\{(\text{エーテル抽出量} / \text{エーテル抽出量} + \text{樹皮の残査}) \times 100\}$ を測定した結果、GLは9.49～16.73％，LLは5.96～9.57％，GGでは10.09～16.65％の値がそれぞれ得られており、野ねずみの嗜好性と樹皮のエーテル抽出量率に 관계があることが示唆されている（Hayashi *et al.*，1998）。このことから、耐鼠性カラマツ品種として開発されたGLは、樹皮に含まれる化学成分の種類・量の相違により、野ねずみの食害を受ける程度に家系間で差異が生じることが考えられる。

林齢5年における樹高の調査結果を、表2-3-2に示した。全ての交雑組合せの樹高において、苗木の伸長成長は、北海道育種場の試験地が釧路試験地よりも優れていた。平均値をみると、北海道育種場の試験地では、GL，LG，LL，GGの順で樹高が高く、釧路では、LG，GL，GGの順であった。両試験地の共通した20家系の樹高を図2-3-2に示した。北海道育種場のGLおよびLGの16家系の樹高は、399～451cmで52cmの範囲を示したが、釧路試験地のGLおよびLGでは、226～405cmの範囲にあり、育種場よりも幅の広い179cmの範囲に家系が分布していた。GGでは、両試験地の樹高に大きな差がなく、243～333cmの範囲を示した。また、釧路試験地における生存率と樹高の関係を図2-3-3に示した。生存率60％以下の15家系については、生存率と樹高との間に相関係数が0.60の有意な正の相関（ $p < 0.05$ ）が示された。本調査の樹高は、全ての生存木の集計結果であるため、野ねずみによる被害木が含まれている。野ねずみの嗜好性は、樹皮の化学成分に影響されるので樹木の成長に関係しないことが推察され、生存率60％以下の家系については、より生存率の低い家系では、生存木でも食害を受けているため、低い樹高を示した可能性があると考えられる。

以上の結果から、GLについては、野ねずみによる食害を受ける程度が家系により異なることが示唆され、樹高でLLおよびGGよりも優れていた。LGは、成長および野ねずみによる食害を受ける程度が、GLに近い傾向を示した。GGは、野ねずみによる食害を受け難いが、樹高が最も劣っていた。LLでは、釧路試験地についてはほとんど枯損していたが、これは野ねずみによる食害が原因と推察される。このためLLの育種および造林には、野ねずみの対策が不可欠である。また、釧路試験地での生存木の成長は、野ねずみの食害による影響を受けていることが示唆された。

表 2-3-2 林齢 5 年における樹高の調査結果

| 試験地 | 樹 高 (cm) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|     | GL       |      |      | LG   |      |      | LL   |      |      | GG   |      |      |
|     | Avg.     | Max. | Min. | Avg. | Max. | Min. | Avg. | Max. | Min. | Avg. | Max. | Min. |
| 育種場 | 423      | 451  | 399  | 406  | 445  | 336  | 352  | 391  | 278  | 271  | 333  | 243  |
| 釧 路 | 335      | 405  | 265  | 347  | 424  | 226  | -    | -    | -    | 264  | 284  | 250  |

育種場試験場(播種後7年)および釧路試験地(播種後8年)ともに林齢5年。

Avg.: 平均値, Max.: 最高値, Min.: 最小値。

-: 釧路試験地のLLは、ほとんど生存していなかったことを示す。

交雑組合せの略号は、表2-3-1参照。

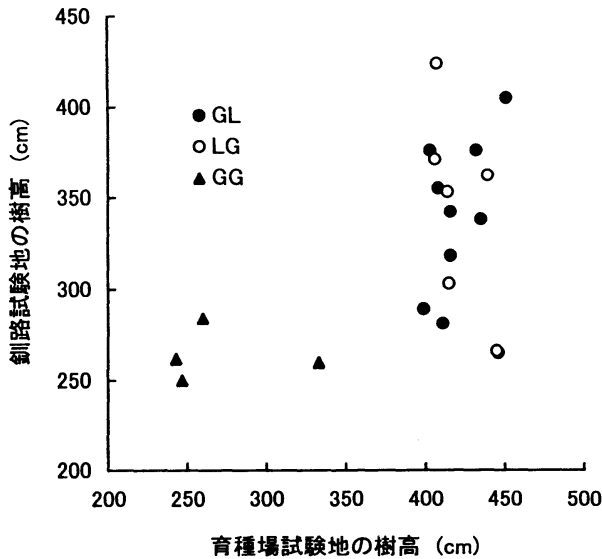


図 2-3-2 育種場と釧路試験地における樹高の関係

交雑組合せの略号は、表 2-3-1 参照

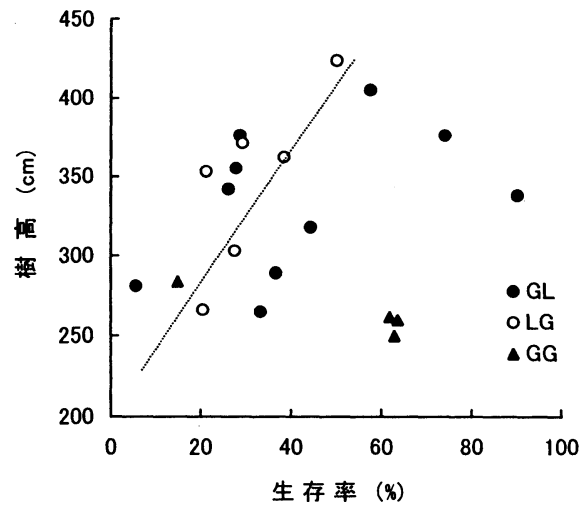


図 2-3-3 釧路試験地における生存率と樹高の関係

回帰直線は、生存率 60% 以下の家系における生存率と樹高の関係を示す。  
交雑組合せの略号は、表 2-3-1 参照。

### 3.3.2 材質諸形質の特徴

GL, LG および LL の組合せ毎の家系数と、それぞれの形質の測定個体数を表 2-3-3 に示した。樹高、胸高直径、根元曲りおよび幹曲りでは、全ての間伐木を供試個体とした。容積密度数および繊維傾斜度では、胸高部位の供試円板に顕著な圧縮あて材の形成されている個体、動的ヤング係数では、極端な幹曲りが発生していた個体を測定から除外した。家系当たりの供試個体数は、GL で 12～16 個体の平均 14 個体、LG で 8～15 個体の平均 13 個体および LL で 7～15 個体の平均 12 個体である。平均年輪数は 7 年輪であるため、材料は全て未成熟材である。特に LL では、偏心した材料が観察されたため、顕著な圧縮あて材が形成されたと判断し、33% の個体で容積密度数および繊維傾斜度の測定を除外した。

表 2-3-3 林木育種センター北海道育種場の林齢 9 年生における GL, LG および LL の各形質の測定個体数

| 交 雑<br>組 合 せ | 家 系 数 | 供 試<br>個 体 数<br>(個) | 測 定 個 体 数 (個)        |                 |             |
|--------------|-------|---------------------|----------------------|-----------------|-------------|
|              |       |                     | 樹高・胸高直径<br>・根元曲り・幹曲り | 容積密度数<br>・繊維傾斜度 | 動的<br>ヤング係数 |
| GL           | 11    | 150                 | 150                  | 149             | 150         |
| LG           | 9     | 118                 | 118                  | 109             | 118         |
| LL           | 8     | 92                  | 92                   | 62              | 90          |
| 計            | 28    | 360                 | 360                  | 320             | 358         |

顕著な曲りを示した個体では、胸高部位で圧縮あて材を形成した個体が多く、容積密度数、繊維傾斜度および動的ヤング係数の測定を除外した。  
交雑組合せの略号は、表 2-3-1 参照。

それぞれの交雑組合せにおける形質の測定結果を、表2-3-4に示した。交雑組合せを併せた形質の平均の範囲は、樹高で6.4～8.0m、胸高直径で6.7～10.6cm、根元曲りで16.8～113.6%、幹曲りで15.5～127.1%、容積密度数で365～420kg/m<sup>3</sup>、動的ヤング係数で56.7～88.5tf/cm<sup>2</sup>および繊維傾斜度で2.0～4.4度であった。繊維傾斜度についてはS旋回を示し、最大繊維傾斜度が髓から3～5年輪に現れた。なお、川口・高橋(1972)および小野寺ら(1977)は、GL, LG, LLおよびGGにおける全乾比重と細胞壁の実質による計算値は良く一致すると報告している。従って、密度に及ぼす抽出成分の影響は、少ないと推察される。

交雑組合せ毎の形質について、家系を要因とした分散分析の結果を表2-3-5に示した。GLでは、根元曲りおよび幹曲り以外の全ての形質で、危険率1%水準で家系間に有意差が認められた。LGでは調査した全ての形質に、危険率1%水準で家系間に有意差が認められた。LLでは胸高直径、根元曲り、動的ヤング係数および繊維傾斜度で、家系間に有意差が認められたが、樹高、幹曲りおよび容積密度数で家系間に有意差が示されなかった。全ての組合せにおいて、胸高直径、動的ヤング係数および繊維傾斜度で家系間に有意差が認められた。

各形質について、交雑組合せ間のt検定の結果を表2-3-6に示した。GL-LGの間では、根元曲りおよび幹曲りで危険率5%水準で組合せ間に有意差が認められたが、他の形質では有意差が認められなかった。GL-LLの間では、繊維傾斜度で組合せ間に有意差が認められなかったが、他の形質では組合せ間に有意差が認められた。LG-LLの間でも、繊維傾斜度で組合せ間に有意差が認められなかったが、他の形質では組合せ間に有意差が認められた。これらの結果から、GL, LGおよびLLの間では、根元曲りおよび幹曲りについては、統計的にGL, LG, LLの順で根元曲りおよび幹曲りが少ないことが示唆される。繊維傾斜度については、GL, LGおよびLLの間で有意差が示されなかった。樹高、胸高直径、容積密度数および動的ヤング係数では、GLおよびLGは、LLとの間に有意差が認められた。なお同じ試験地の材料を用いて、カラマツ造林の重大な阻害要因である野ねずみの食害および先枯病の調査の結果、GLおよびLGは、LLに比べて、野ねずみの食害程度が少なく、先枯病の被害程度が低いことが確認されている(飯塚ら, 2000e)。

次に、全ての供試個体を用いて測定した樹高、胸高直径、根元曲りおよび幹曲りのデータについて、GL, LGおよびLLの28家系における形質間の相関係数を表2-3-7に示した。それぞれの形質間に危険率1%水準で有意差が示された。樹高および胸高直径と根元曲りおよび幹曲りとの間に、負の相関が示された。また、根元曲りと幹曲りとの間に正の相関が示された。胸高直径と根元曲りの関係を図2-3-4に示した。GLの全ての家系とLG家系の8家系で

表2-3-4 林齢9年生におけるGL, LGおよびLLの各形質の測定結果

| 形 質                           | GL   |      |      | LG   |      |      | LL   |       |      |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
|                               | Avg. | Max. | Min. | Avg. | Max. | Min. | Avg. | Max.  | Min. |
| 樹 高 (m)                       | 7.5  | 7.9  | 7.1  | 7.4  | 8.0  | 6.5  | 6.9  | 7.5   | 6.4  |
| 胸高直径 (cm)                     | 9.3  | 10.6 | 8.3  | 9.0  | 9.8  | 8.0  | 7.6  | 8.6   | 6.7  |
| 根元曲り (%)                      | 22.1 | 27.2 | 16.8 | 29.9 | 58.3 | 17.2 | 64.6 | 113.6 | 49.2 |
| 幹 曲 り (%)                     | 26.3 | 35.6 | 15.5 | 41.3 | 58.6 | 29.3 | 76.8 | 127.1 | 35.8 |
| 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> )    | 395  | 420  | 369  | 396  | 419  | 385  | 377  | 388   | 365  |
| 動的ヤング係数 (tf/cm <sup>2</sup> ) | 75.3 | 88.5 | 65.9 | 72.5 | 87.0 | 65.0 | 62.9 | 70.9  | 56.7 |
| 繊維傾斜度 (度)                     | 3.1  | 2.3  | 4.4  | 3.1  | 2.0  | 4.3  | 2.7  | 2.0   | 3.5  |

Avg.: 平均値, Max.: 家系の最大値, Min.: 家系の最小値。  
交雑組合せの略号は、表2-3-1参照。

表 2-3-5 GL, LG および LL の各形質に関する家系を要因とした分散分析結果

| 形 質     | 自 由 度 |     | 平 均 平 方   |          | 分散比       |
|---------|-------|-----|-----------|----------|-----------|
|         | 家系間   | 家系内 | 家系間       | 家系内      |           |
| GL      |       |     |           |          |           |
| 樹 高     | 10    | 139 | 1.018     | 0.359    | 2.836 **  |
| 胸高直径    | 10    | 139 | 5.691     | 1.649    | 3.451 **  |
| 根元曲り    | 10    | 139 | 137.547   | 115.610  | 1.190 n.s |
| 幹 曲 り   | 10    | 139 | 624.454   | 334.411  | 1.867 n.s |
| 容積密度数   | 10    | 138 | 4230.553  | 390.936  | 10.822 ** |
| 動的ヤング係数 | 10    | 139 | 663.314   | 79.881   | 8.304 **  |
| 繊維傾斜度   | 10    | 138 | 4.023     | 1.196    | 3.364 **  |
| LG      |       |     |           |          |           |
| 樹 高     | 8     | 109 | 2.067     | 0.608    | 3.400 **  |
| 胸高直径    | 8     | 109 | 5.270     | 1.472    | 3.580 **  |
| 根元曲り    | 8     | 109 | 1540.113  | 284.780  | 5.408 **  |
| 幹 曲 り   | 8     | 109 | 3493.371  | 771.766  | 4.526 **  |
| 容積密度数   | 8     | 100 | 1822.865  | 295.112  | 6.177 **  |
| 動的ヤング係数 | 8     | 109 | 673.344   | 108.475  | 6.207 **  |
| 繊維傾斜度   | 8     | 100 | 6.004     | 1.044    | 5.751 **  |
| LL      |       |     |           |          |           |
| 樹 高     | 7     | 84  | 1.325     | 0.666    | 2.121 n.s |
| 胸高直径    | 7     | 84  | 4.405     | 1.983    | 2.860 *   |
| 根元曲り    | 7     | 84  | 12106.366 | 4015.659 | 3.015 **  |
| 幹 曲 り   | 7     | 84  | 3237.102  | 1806.358 | 1.792 n.s |
| 容積密度数   | 7     | 54  | 414.728   | 286.615  | 1.447 n.s |
| 動的ヤング係数 | 7     | 82  | 309.780   | 133.339  | 2.323 *   |
| 繊維傾斜度   | 7     | 54  | 2.403     | 0.939    | 2.559 *   |

\*\*: 危険率1%水準で有意, \*: 危険率5%水準で有意, n.s: 非有意。  
交雑組合せの略号は, 表2-3-1参照。

表 2-3-6 各形質における樹種の組合せ間の  $t$  検定結果

| 形 質     | GL-LG |           | GL-LL |           | LG-LL |           |
|---------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
|         | 自由度   | $t$ 値     | 自由度   | $t$ 値     | 自由度   | $t$ 値     |
| 樹 高     | 18    | 0.266 n.s | 17    | 4.038 **  | 15    | 2.679 *   |
| 胸高直径    | 18    | 0.785 n.s | 17    | 5.326 **  | 15    | 4.392 **  |
| 根元曲り    | 18    | 2.112 *   | 17    | 6.837 **  | 15    | 4.342 **  |
| 幹 曲 り   | 18    | 2.642 *   | 17    | 5.450 **  | 15    | 3.023 **  |
| 容積密度数   | 18    | 0.082 n.s | 17    | 2.742 *   | 15    | 3.870 **  |
| 動的ヤング係数 | 18    | 0.903 n.s | 17    | 4.185 **  | 15    | 3.253 **  |
| 繊維傾斜度   | 18    | 0.190 n.s | 17    | 1.500 n.s | 15    | 1.348 n.s |

\*\*: 危険率1%水準で有意, \*: 危険率5%水準で有意, n.s: 非有意。  
交雑組合せの略号は, 表2-3-1参照。

表 2-3-7 GL, LG, LL を併せた家系の形質間の相関係数

| 形 質   | 樹 高       | 胸高直径      | 根元曲り     | 幹曲り   |
|-------|-----------|-----------|----------|-------|
| 樹 高   | 1.000     |           |          |       |
| 胸高直径  | 0.860 **  | 1.000     |          |       |
| 根元曲り  | -0.576 ** | -0.807 ** | 1.000    |       |
| 幹 曲 り | -0.508 ** | -0.622 ** | 0.724 ** | 1.000 |

家系数:28

\*\* : 危険率1%水準で有意。

交雑組合せの略号は、表2-3-1参照。

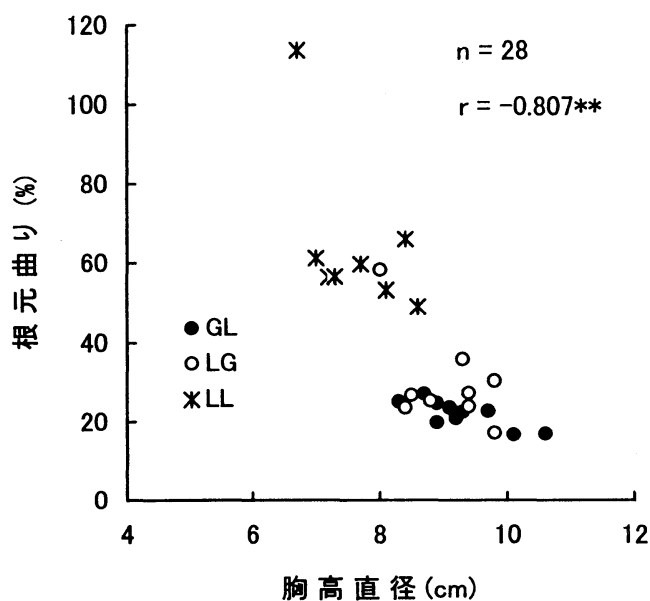


図 2-3-4 胸高直径と根元曲りの関係

n : 家系数, \*\* : 危険率1%水準で有意。

交雑組合せの略号は、表 2-3-1 参照。

は、胸高直径で8～11cmの範囲、根元曲りで17～38%の範囲を示した。LGの1家系は、LLの平均的な根元曲りと同程度の値を示し、一方LLの1家系は、根元曲りが110%以上の極端な値を示し、胸高直径が最も小さい値を示した。

小野寺ら(1977)は、短期伐採造林のカラマツ材では、ほとんどが重曲材であり、根元曲りの大きな個体では幹材でも極めて大きな曲りを示し、また真円性、通幹性が必ずしも良好とはいえないことを指摘している。本研究においても、LLには大きな根元曲りを示した個体や重曲材の個体が観察された。この影響と推察されるが、胸高部位において顕著な圧縮あて材の形成が観察されたため、容積密度数および繊維傾斜度の測定を除外した個体は、LLで全供試個体の33%存在していたが、LGで8%、GLでは1%以下であった。

以上の結果から、GLとLGはLLと比べて、成長形質である樹高と胸高直径が良好で、材質形質である容積密度数と動的ヤング係数で高い値を示し、根元曲りと幹曲りが少ない特徴を示した。繊維傾斜度では、GL、LGおよびLLの間に統計的な有意差が示されなかった。LLは、根元曲りと幹曲りが大きいことが影響し、樹高と胸高直径がGLとLGよりも劣っているものと示唆される。

カラマツはグイマツと交雑することで、その種間雑種であるGLおよびLGは、根元曲りおよび幹曲りが遺伝的に改良されるとともに、容積密度数および動的ヤング係数の値が高くなることが示唆された。しかし、本調査における繊維傾斜度については、改良効果が示されなかった。

### 3.4 要 旨

若齢のグイマツとカラマツ精英樹クローンをを用いた人工交雑で得た種内および種間雑種の子供家系について、成長、材質諸形質に関する特徴を検討した。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 釧路試験地において、GLおよびLGは樹高および野ねずみによる食害の受ける程度で、同様な値を示した。GGは最も高い生存率の値を示した。LLは野ねずみの食害のため、ほとんど枯損していた。また生存木の成長については、野ねずみの食害の影響を受けていることが推察された。
- (2) 北海道育種場試験地の林齢5年生および9年生の樹高は、GLおよびLGではLLと比べて高い値を示した。林齢9年生における胸高直径、根元曲り、幹曲り、容積密度数および動的ヤング係数では、カラマツとグイマツを交雑することで、GLおよびLGに改良効果があることが示唆された。しかし、本調査における繊維傾斜度については、交雑による改良効果が示されなかった。
- (3) LLは野ねずみの食害を受けやすく、根元曲りおよび幹曲りが大きいため、造林樹種および木材としての経済価値が低いと考えられる。しかしグイマツと交雑することで、これらの欠点が改良され、また容積密度数および動的ヤング係数の値が向上することが示された。

## 第4節 グイマツ雑種F<sub>1</sub>家系の材質変異

### 4.1 はじめに

林木は利用径級に達するのに長期間を要するため、早期に成長や材質特性を評価することが、林木育種を進めるに当たり特に重要である。材質形質に関して、加納ら(1973)は、カラマツの繊維傾斜度、アカマツの繊維長およびアカマツとスギの比重について、早期検定の可能性を検討した。カラマツについては、旋回木理による繊維傾斜度は早期検定できる(三上, 1988)と報告されており、容積密度数についても早期検定の可能性が示唆されている(野堀ら, 1988; 小泉ら, 1990a; 大島, 1998)。またグイマツ雑種F<sub>1</sub>は、カラマツと同様に、トドマツやアカエゾマツと比べて著しく成長が良好である(北方林業会, 1982)といわれており、若齢木では木材に占める未成熟材の比率が高いと考えられる。特に短伐期樹種の育種では、未成熟材の性質を明らかにすることが重要である(Ridoutt・Sorensson, 1999)。このため、グイマツ雑種F<sub>1</sub>の材質育種を進めるには、未成熟材の容積密度数や年輪構造に関する家系間の変異を検討する必要がある。しかし、若齢期における家系間の材質変異については、これまで報告されていない。

一方、遺伝学では、雑種強勢の程度を表す基準として両親の平均を基準とする場合と、あるいは優れた方の親を基準にすることがある(鈴木・志賀, 1976)。また倉橋(1988)は、GLの諸形質について、両親種の間かいずれ

の方に多少偏ることを見出し、交雑組合せによって形質の値が変動するため、母樹と花粉親の個体選抜の必要性について示唆している。従って、母樹と花粉親の組合せによる子供家系への遺伝性を明らかにする必要がある。

前節では、交雑組合せで得られた雑種の成長および材質諸形質の特徴について検討した。本節では、GL家系の優良品種開発の基礎的な知見を得ることを目的として、家系毎に議論する。両親の組合せによる変異を把握するため、完全ダイアレルクロスにより得られたGL9家系とLG9家系の正逆家系を用いて、樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度に関する母樹および花粉親の能力について検討した。さらに、GL11家系の容積密度数および年輪幅について、両親クローンと子供家系の親子回帰による狭義の遺伝率を推定し、材質育種および材質の早期評価の可能性を検討した。

## 4.2 材料と方法

### 4.2.1 正逆家系およびグイマツ雑種F<sub>1</sub>家系

材料は、前述した(第2章第3節)林木育種センター北海道育種場の試験地に植栽された林齢9年生において、完全ダイアレルクロスにより得られた種間雑種のうち、GL9家系とLG9家系の正逆家系を用いた。個体数は、GLが124個体、LGが109個体で、1家系の個体数は、8～16個体、平均13個体である。人工交雑に用いた母樹と花粉親は各3クローンで、グイマツ(G)が、中標津4(G1)、川北4(G2)および留萌1(G3)、また、カラマツ(L)が、諏訪16(L1)、諏訪14(L2)および遠野1(L3)である。

検討した項目は、GLで家系間に有意差が認められた樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度の5形質である。

### 4.2.2 親子回帰による容積密度数の狭義の遺伝率の推定

材料の子供家系は、前述した(第2章第3節)林齢9年生のGL11家系149個体である。交雑に用いた母樹と花粉親は、グイマツ(G)が中標津4(G1)、川北4(G2)および留萌1(G3)、カラマツが諏訪16(L1)、諏訪14(L2)、遠野1(L3)および十勝43(L4)であり、それぞれ母樹のグイマツで3クローン、花粉親のカラマツで4クローンである。人工交雑に用いた個体では、着花促進のため樹皮が環状に剥皮されているため、そのような個体を除き、1クローンにつき3個体を供試したが、十勝43は2個体のみの測定であり、合計20個体について調査した。

交雑に用いた母樹と花粉親は、北海道育種場の平坦な育種素材保存園にクローン単位で植栽されている。母樹と花粉親の容積密度数と年輪幅を測定するため、2000年4月にクローンの各個体の胸高部位から、内径10mmの成長錘により、髄から樹皮に至る試験体を採取した。採取した試験体を、髄から10年輪以内を樹心部、26年輪以降の部位を辺縁部に区分し、5年輪単位に試験片を作製後、容積密度数と年輪幅を測定した。容積密度数の測定は、前述した方法(第2章第2節2.2)と同様に秤量法で行った。

## 4.3 結果と考察

### 4.3.1 正逆家系およびグイマツ雑種F<sub>1</sub>家系

それぞれの家系における各形質の平均値および最小有意差法による区分を、表2-4-1に示した。GLとLGの全家系について、各形質の平均値の範囲をみると、樹高は6.5～8.0m、胸高直径は8.0～10.1cm、容積密度数は369～420kg/m<sup>3</sup>、動的ヤング係数は64.3～88.5tf/cm<sup>2</sup>および繊維傾斜度は2.0～4.4度であった。

表 2-4-1 各家系（交雑組合せ）における各形質の平均値および最小有意法による区分

| GL家系                         |      |                   |                   |                   |      | LG家系 |                   |                   |                   |      |      |
|------------------------------|------|-------------------|-------------------|-------------------|------|------|-------------------|-------------------|-------------------|------|------|
| 樹高(m)                        |      |                   |                   |                   |      |      |                   |                   |                   |      |      |
|                              |      | 花 粉 親             |                   |                   |      |      |                   | 花 粉 親             |                   |      |      |
|                              |      | L1                | L2                | L3                | Avg. |      |                   | G1                | G2                | G3   | Avg. |
| 母樹                           | G1   | 7.5 <sup>a</sup>  | 7.5 <sup>a</sup>  | 7.2 <sup>b</sup>  | 7.4  | L1   | 7.4 <sup>b</sup>  | 7.0 <sup>b</sup>  | 8.0 <sup>a</sup>  | 7.5  |      |
|                              | G2   | 7.1 <sup>b</sup>  | 7.3 <sup>b</sup>  | 7.3 <sup>b</sup>  | 7.2  | L2   | 7.3 <sup>b</sup>  | 6.5 <sup>c</sup>  | 7.5 <sup>a</sup>  | 7.1  |      |
|                              | G3   | 7.5 <sup>a</sup>  | 7.6 <sup>a</sup>  | 7.9 <sup>a</sup>  | 7.7  | L3   | 7.5 <sup>a</sup>  | 7.6 <sup>a</sup>  | 7.9 <sup>a</sup>  | 7.7  |      |
|                              | Avg. | 7.4               | 7.5               | 7.5               | 7.4  | Avg. | 7.4               | 7.0               | 7.8               | 7.4  |      |
| 胸高直径(cm)                     |      |                   |                   |                   |      |      |                   |                   |                   |      |      |
|                              |      | 花 粉 親             |                   |                   |      |      |                   | 花 粉 親             |                   |      |      |
|                              |      | L1                | L2                | L3                | Avg. |      |                   | G1                | G2                | G3   | Avg. |
| 母樹                           | G1   | 8.7 <sup>b</sup>  | 9.1 <sup>b</sup>  | 9.2 <sup>a</sup>  | 9.0  | L1   | 8.5 <sup>b</sup>  | 8.8 <sup>b</sup>  | 9.4 <sup>a</sup>  | 8.9  |      |
|                              | G2   | 8.3 <sup>b</sup>  | 8.9 <sup>b</sup>  | 8.9 <sup>c</sup>  | 8.7  | L2   | 8.0 <sup>c</sup>  | 8.4 <sup>b</sup>  | 9.8 <sup>a</sup>  | 8.7  |      |
|                              | G3   | 9.3 <sup>a</sup>  | 10.1 <sup>a</sup> | 9.7 <sup>a</sup>  | 9.7  | L3   | 9.8 <sup>a</sup>  | 9.3 <sup>a</sup>  | 9.4 <sup>a</sup>  | 9.5  |      |
|                              | Avg. | 8.8               | 9.4               | 9.3               | 9.1  | Avg. | 8.8               | 8.8               | 9.5               | 9.0  |      |
| 容積密度数(kg/m <sup>3</sup> )    |      |                   |                   |                   |      |      |                   |                   |                   |      |      |
|                              |      | 花 粉 親             |                   |                   |      |      |                   | 花 粉 親             |                   |      |      |
|                              |      | L1                | L2                | L3                | Avg. |      |                   | G1                | G2                | G3   | Avg. |
| 母樹                           | G1   | 419 <sup>a</sup>  | 420 <sup>a</sup>  | 403 <sup>b</sup>  | 414  | L1   | 419 <sup>a</sup>  | 401 <sup>b</sup>  | 390 <sup>c</sup>  | 403  |      |
|                              | G2   | 398 <sup>b</sup>  | 413 <sup>a</sup>  | 395 <sup>c</sup>  | 402  | L2   | 404 <sup>b</sup>  | 392 <sup>c</sup>  | 385 <sup>c</sup>  | 394  |      |
|                              | G3   | 386 <sup>c</sup>  | 383 <sup>d</sup>  | 369 <sup>d</sup>  | 379  | L3   | 397 <sup>b</sup>  | 393 <sup>c</sup>  | 379 <sup>d</sup>  | 390  |      |
|                              | Avg. | 401               | 405               | 389               | 398  | Avg. | 407               | 395               | 385               | 396  |      |
| 動的ヤング係数(tf/cm <sup>2</sup> ) |      |                   |                   |                   |      |      |                   |                   |                   |      |      |
|                              |      | 花 粉 親             |                   |                   |      |      |                   | 花 粉 親             |                   |      |      |
|                              |      | L1                | L2                | L3                | Avg. |      |                   | G1                | G2                | G3   | Avg. |
| 母樹                           | G1   | 88.5 <sup>a</sup> | 81.1 <sup>a</sup> | 76.0 <sup>b</sup> | 81.9 | L1   | 87.0 <sup>a</sup> | 77.7 <sup>b</sup> | 73.0 <sup>c</sup> | 79.2 |      |
|                              | G2   | 77.9 <sup>b</sup> | 77.5 <sup>b</sup> | 74.4 <sup>c</sup> | 76.6 | L2   | 67.7 <sup>d</sup> | 70.5 <sup>c</sup> | 66.2 <sup>d</sup> | 68.1 |      |
|                              | G3   | 69.1 <sup>c</sup> | 65.9 <sup>d</sup> | 64.3 <sup>d</sup> | 66.4 | L3   | 75.4 <sup>b</sup> | 70.1 <sup>c</sup> | 65.0 <sup>d</sup> | 70.2 |      |
|                              | Avg. | 78.5              | 74.8              | 71.6              | 75.0 | Avg. | 76.7              | 72.8              | 68.1              | 72.5 |      |
| 繊維傾斜度(度)                     |      |                   |                   |                   |      |      |                   |                   |                   |      |      |
|                              |      | 花 粉 親             |                   |                   |      |      |                   | 花 粉 親             |                   |      |      |
|                              |      | L1                | L2                | L3                | Avg. |      |                   | G1                | G2                | G3   | Avg. |
| 母樹                           | G1   | 2.3 <sup>b</sup>  | 3.0 <sup>c</sup>  | 3.3 <sup>c</sup>  | 2.9  | L1   | 2.4 <sup>b</sup>  | 3.1 <sup>c</sup>  | 2.9 <sup>c</sup>  | 2.8  |      |
|                              | G2   | 2.9 <sup>c</sup>  | 3.3 <sup>c</sup>  | 4.4 <sup>d</sup>  | 3.5  | L2   | 2.0 <sup>a</sup>  | 4.0 <sup>d</sup>  | 2.7 <sup>b</sup>  | 2.9  |      |
|                              | G3   | 2.3 <sup>b</sup>  | 3.0 <sup>c</sup>  | 3.3 <sup>c</sup>  | 2.9  | L3   | 3.2 <sup>c</sup>  | 4.3 <sup>d</sup>  | 3.6 <sup>c</sup>  | 3.7  |      |
|                              | Avg. | 2.5               | 3.1               | 3.7               | 3.1  | Avg. | 2.5               | 3.8               | 3.1               | 3.1  |      |

交雑組合せの略号は、表2-3-1参照。

注1: G1:中標津4, G2:川北4, G3:留萌1

L1:諏訪16, L2:諏訪14, L3:遠野1

注2:行は母樹家系, 列は花粉親家系を示す。

注3: a, b, c, dは、最小有意差法による18家系の間での区分。

樹高と胸高直径は、値の大きいグループの順にa, b, cの3区分。

容積密度数と動的ヤング係数は、値の大きい順にa, b, c, dの4区分で示した。

繊維傾斜度は、値の大きい順にd, c, b, aの4区分で示した。

GLとIGを併せた全18家系の各形質について、家系を要因とした分散分析の結果を表2-4-2に示した。全ての形質について、危険率1%水準で家系間に有意差が認められた。材質形質である容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度は、成長形質である樹高と胸高直径と比べて分散比が高い値を示した。

次に、種間交雑の母樹と花粉親の能力について検討を行うため、全家系を対象とした分散分析の結果(表2-4-2)から、最小有意差法( $p < 0.05$ ) (奥野, 1978)により、測定値の高い家系を基準にしてグループ分けを試み、その結果を表2-4-1に示した。樹高、胸高直径、容積密度数および動的ヤング係数は、値の高いグループ順にa, b, c, dの符号で表示し、樹高と胸高直径は3グループに、容積密度数と動的ヤング係数は4グループに区分し、一方、繊維傾斜度は、値の大きい順にd, c, b, aの4グループに区分した。さらに、GLとIGにおける母樹および花粉親の家系毎の測定結果とt検定の結果を、表2-4-3に示した。なお各家系の個体数が異なるため、母樹家系および花粉親家系の個体毎の平均値が、表2-4-1の家系毎の平均値と異なる場合がある。

樹高と胸高直径についてみると、G3の母樹家系と花粉親家系およびI3の母樹家系は、aグループに属した。t検定の結果、G3の母樹家系と花粉親家系およびI3の母樹家系が、有意に優れている傾向を示した。また、容積密度数と動的ヤング係数については、G1の母樹家系はaとbの上位グループに属し、G3の母樹家系と花粉親家系はcとdの下位グループに属した。t検定の結果、母樹家系として高い値を示した順では、 $G1 > G2 > G3$  および  $I1 \geq I2 \geq I3$ 、花粉親家系での順では、 $G1 \geq G2 \geq G3$  および  $I1 \geq I2 \geq I3$  の傾向を示した。繊維傾斜度は、G2およびI3の母樹と花粉親家系で、cとdの下位グループであった。t検定の結果、G2およびI3の母樹家系と花粉親家系で、有意に高い値を示した。G1とG3との間およびI1とI2との間の母樹家系と花粉親家系については、有意差を示さなかった。

以上のことから、樹高、胸高直径については、G3は母樹と花粉親およびI3は母樹として優れていることが判明した。容積密度数および動的ヤング係数については、G1とI1が母樹および花粉親としての能力が優れており、G3とI3で母樹能力および花粉親の能力が劣っている傾向を示した。繊維傾斜度では、G2とI3が母樹能力および花粉親の能力が劣っていた。

次に各形質について、GLとIGの正逆交雑の関係にある家系間のt検定の結果を表2-4-4に示した。全ての形質について、正逆家系間で有意差が示されなかった。また、正逆家系間の関係を図2-4-1に示した。この場合、全ての形質について相関係数が0.55以上の値を示したが、樹高と胸高直径については正逆家系間に有意な正の相関は示され

表2-4-2 GLとIGを併せた全家系による各形質における  
家系を要因とした分散分析結果

| 形 質     | 自 由 度 |     | 平 均 平 方  |         | 分散比      |
|---------|-------|-----|----------|---------|----------|
|         | 家系間   | 家系内 | 家系間      | 家系内     |          |
| 樹 高     | 17    | 225 | 1.356    | 0.484   | 2.802 ** |
| 胸高直径    | 17    | 225 | 4.391    | 1.638   | 2.681 ** |
| 容積密度数   | 17    | 215 | 2913.822 | 341.805 | 8.525 ** |
| 動的ヤング係数 | 17    | 225 | 700.790  | 96.684  | 7.248 ** |
| 繊維傾斜度   | 17    | 215 | 5.161    | 1.098   | 4.700 ** |

\*\*：危険率1%水準で有意。  
交雑組合せの略号は、表2-3-1参照。

表 2-4-3 GL と LG における母樹および花粉親の家系毎の測定結果と  $t$  検定結果

| GL家系の母樹(G)毎の解析 |      |      |      |      |      |      | t 検 定 の 結 果 |           |       |           |       |          | 母材の能力    |
|----------------|------|------|------|------|------|------|-------------|-----------|-------|-----------|-------|----------|----------|
| 形 質            | G1   |      | G2   |      | G3   |      | G1-G2       |           | G1-G3 |           | G2-G3 |          |          |
|                | Avg. | Std. | Avg. | Std. | Avg. | Std. | 自由度         | t値        | 自由度   | t値        | 自由度   | t値       |          |
| 樹 高            | 7.4  | 0.5  | 7.2  | 0.8  | 7.7  | 0.5  | 82          | 1.004 n.s | 80    | 2.837 **  | 82    | 3.267 ** | G3>G1=G2 |
| 胸高直径           | 9.0  | 1.3  | 8.7  | 1.3  | 9.7  | 1.4  | 82          | 1.142 n.s | 80    | 2.320 *   | 82    | 3.426 ** | G3>G1=G2 |
| 容積密度数          | 414  | 24   | 402  | 20   | 379  | 18   | 81          | 2.625 *   | 80    | 7.641 **  | 81    | 5.561 ** | G1>G2>G3 |
| 動的ヤング係数        | 81.7 | 9.8  | 76.7 | 9.0  | 66.3 | 10.0 | 81          | 2.405 *   | 80    | 7.011 **  | 81    | 4.953 ** | G1>G2>G3 |
| 繊維傾斜度          | 2.9  | 1.3  | 3.5  | 1.2  | 2.9  | 1.0  | 81          | 2.355 *   | 80    | 0.010 n.s | 81    | 2.606 *  | G1=G3>G2 |

| GL家系の花粉親(L)毎の解析 |      |      |      |      |      |      |       |           |       |           |       |           |                     |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|---------------------|
| 形 質             | L1   |      | L2   |      | L3   |      | L1-L2 |           | L1-L3 |           | L2-L3 |           |                     |
|                 | Avg. | Std. | Avg. | Std. | Avg. | Std. | 自由度   | t値        | 自由度   | t値        | 自由度   | t値        |                     |
| 樹 高             | 7.4  | 0.6  | 7.4  | 0.7  | 7.5  | 0.6  | 81    | 0.489 n.s | 79    | 0.628 n.s | 84    | 0.117 n.s | L1=L2=L3            |
| 胸高直径            | 8.8  | 1.2  | 9.4  | 1.6  | 9.3  | 1.3  | 81    | 1.900 n.s | 79    | 1.862 n.s | 84    | 0.236 n.s | L1=L2=L3            |
| 容積密度数           | 400  | 23   | 406  | 23   | 388  | 25   | 80    | 1.345 n.s | 79    | 2.163 *   | 83    | 3.492 **  | L1>L2>L3            |
| 動的ヤング係数         | 78.3 | 10.7 | 75.4 | 10.1 | 71.3 | 12.5 | 81    | 1.246 n.s | 79    | 2.682 **  | 84    | 1.680 n.s | L1>L3, L1=L2, L2=L3 |
| 繊維傾斜度           | 2.5  | 1.0  | 3.1  | 1.0  | 3.7  | 1.3  | 80    | 2.491 *   | 79    | 4.334 **  | 83    | 2.300 *   | L1>L2>L3            |

| LG家系の母樹(L)毎の解析 |      |      |      |      |      |      |       |           |       |          |       |           |          |
|----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-----------|-------|----------|-------|-----------|----------|
| 形 質            | L1   |      | L2   |      | L3   |      | L1-L2 |           | L1-L3 |          | L2-L3 |           |          |
|                | Avg. | Std. | Avg. | Std. | Avg. | Std. | 自由度   | t値        | 自由度   | t値       | 自由度   | t値        |          |
| 樹 高            | 7.4  | 0.9  | 7.1  | 0.8  | 7.8  | 0.7  | 73    | 1.391 n.s | 83    | 2.050 *  | 74    | 3.587 **  | L3>L1=L2 |
| 胸高直径           | 8.9  | 1.1  | 8.9  | 1.8  | 9.5  | 1.0  | 73    | 0.163 n.s | 83    | 2.698 ** | 74    | 1.768 n.s | L3>L1=L2 |
| 容積密度数          | 406  | 18   | 392  | 19   | 389  | 18   | 66    | 3.111 **  | 80    | 4.138 ** | 66    | 0.486 n.s | L1>L2=L3 |
| 動的ヤング係数        | 79.6 | 11.8 | 67.7 | 10.8 | 70.2 | 10.5 | 73    | 4.500 **  | 83    | 3.881 ** | 74    | 1.017 n.s | L1>L2=L3 |
| 繊維傾斜度          | 2.8  | 0.9  | 2.8  | 1.3  | 3.7  | 1.1  | 66    | 0.005 n.s | 80    | 3.996 ** | 66    | 3.188 **  | L1=L2>L3 |

| LG家系の花粉親(G)毎の解析 |      |      |      |      |      |      |       |           |       |           |       |           |                     |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|---------------------|
| 形 質             | G1   |      | G2   |      | G3   |      | G1-G2 |           | G1-G3 |           | G2-G3 |           |                     |
|                 | Avg. | Std. | Avg. | Std. | Avg. | Std. | 自由度   | t値        | 自由度   | t値        | 自由度   | t値        |                     |
| 樹 高             | 7.5  | 1.0  | 7.2  | 0.9  | 7.7  | 0.6  | 74    | 1.406 n.s | 79    | 0.920 n.s | 77    | 2.892 *   | G3>G2, G1=G2, G1=G3 |
| 胸高直径            | 8.8  | 1.6  | 8.8  | 1.1  | 9.5  | 1.0  | 74    | 0.101 n.s | 79    | 2.311 *   | 77    | 2.724 **  | G3>G1=G2            |
| 容積密度数           | 407  | 17   | 390  | 19   | 384  | 17   | 66    | 3.867 **  | 73    | 5.700 **  | 73    | 1.385 n.s | G1>G2=G3            |
| 動的ヤング係数         | 77.9 | 13.7 | 73.1 | 9.6  | 67.9 | 10.7 | 74    | 1.771 n.s | 79    | 3.667 **  | 77    | 2.242 *   | G1=G2>G3            |
| 繊維傾斜度           | 2.6  | 0.9  | 3.7  | 1.1  | 3.0  | 1.2  | 66    | 4.511 **  | 73    | 1.647 n.s | 73    | 2.502 *   | G1=G3>G2            |

Avg.: 平均値, Std.: 標準偏差。

\*\*: 危険率1%水準で有意, \*: 危険率5%水準で有意, n.s.: 非有意。

「母材の能力」とは、母樹あるいは花粉親として家系に及ぼす影響に、統計的な有意差がある(&gt;), あるいは有意差が無い(=)ことを示す。

交雑組合せの略号は、表2-3-1参照。

表 2-4-4 完全ダイアレル交雑における正逆家系間の  
形質の  $t$  検定結果

| 形質      | $t$ 検定の結果 |           |
|---------|-----------|-----------|
|         | 自由度       | $t$ 値     |
| 樹高      | 8         | 0.177 n.s |
| 胸高直径    | 8         | 0.488 n.s |
| 容積密度数   | 8         | 0.872 n.s |
| 動的ヤング係数 | 8         | 1.425 n.s |
| 繊維傾斜度   | 8         | 0.262 n.s |

n.s.: 非有意。

なかった。容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度では、正逆家系の間に有意な正の相関（それぞれ  $r = 0.833^{**}$ ,  $0.754^{*}$ ,  $0.734^{*}$ ）を示した。

複数のグイマツとカラマツ精英樹クローンが混植されている採種園において、自然受粉によってグイマツ母樹から GL の種子が生産される。そのため採種に当たり、母樹のグイマツは特定できるが、花粉親のカラマツを特定することが困難である。そこで、遺伝性が高い形質であると推察される容積密度数と動的ヤング係数に関して、母樹

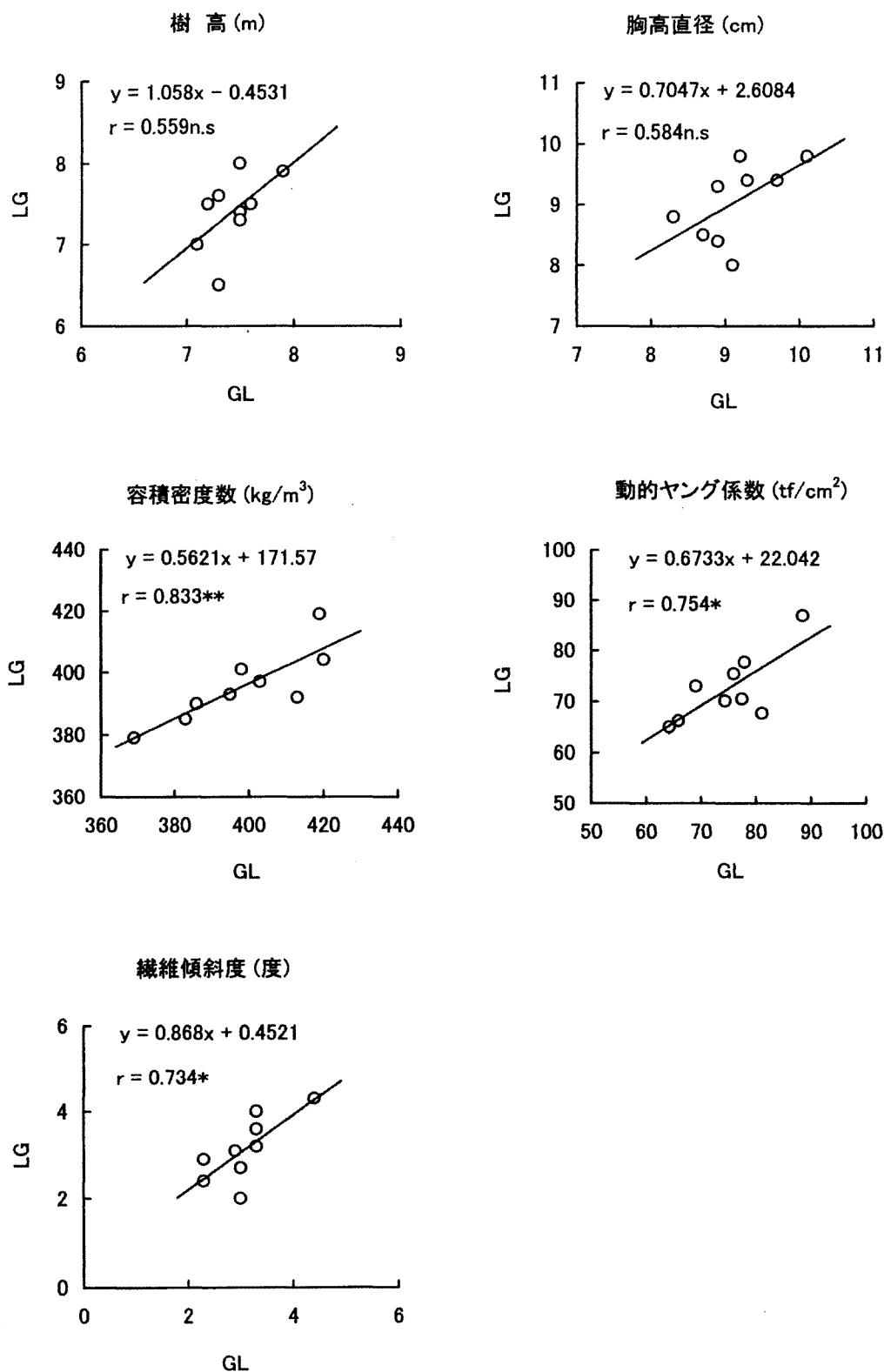


図 24-1 GLとLGの諸形質における正逆家系間の関係

\*\* : 危険率 1 % 水準で有意, \* : 危険率 5 % 水準で有意, n.s : 非有意。  
交雑組合せの略号は, 表 2-3-1 参照

家系による形質の差異を検討した。表 2-4-1 および表 2-4-3 の結果から得られた容積密度数および動的ヤング係数が優れている G1 母樹家系 (G1 × L1, G1 × L2, G1 × L3) と、それらの材質形質が劣っている G3 母樹家系 (G3 × L1, G3 × L2, G3 × L3) について、G1 と G3 母樹家系における形質間の相互関係を調べるため、容積密度数、動的ヤング係数および胸高直径について、それぞれ形質間の関係を図 2-4-2 に示した。G1 と G3 の母樹家系ともに、容積密度数と動的ヤング係数との間に有意な正の相関 ( $r(G1) = 0.335^*$ ,  $r(G3) = 0.396^*$ ) を示した。G1 母樹家系では、胸高直径と容積密度数および動的ヤング係数との間に、有意な相関が認められなかったが、G3 母樹家系では、これらの間に有意な負の相関 ( $r(G3) = -0.308^*$ ,  $r(G3) = -0.391^*$ ) が認められた。すなわち、G1 と G3 母樹家系における胸高直径と容積密度数および動的ヤング係数との間の関係は異なっていることが示された。

繊維傾斜度については、G2 母樹が G1 および G3 母樹により、その家系の繊維傾斜度が高い値を示すことが示唆されるので (表 2-4-1 および表 2-4-3)、採種園の改良および採種に当たり母樹の特性を考慮する必要がある。

GL に関しては、特定の母樹と花粉親の組合せにより、成長が早く、通直性が高く、繊維傾斜度が低いなどの優良品種の作出が報告されている (倉橋, 1995; 大島, 1995)。容積密度数と動的ヤング係数について、特定の交雑組合せによる家系間の差異を検討するため、動的ヤング係数の最も高い値を示した G1 × L1 家系と最も低い値を示した G3 × L3 家系の比較を行った。容積密度数と動的ヤング係数の関係を図 2-4-3 に示した。G1 × L1 家系は 12 個体、G3 × L3 家系は 15 個体である。両家系ともに、容積密度数と動的ヤング係数との間に、有意な正の相関 (G1 × L1 家系:  $r = 0.908^{**}$ , G3 × L3 家系:  $r = 0.691^{**}$ ) を示した。これらの形質の測定値は家系間でよく分離しており、容積密度数と動的ヤング係数の高い家系、あるいは低い家系を作出できる可能性があることを示している。

以上の結果から、林齢 9 年生の GL と LG の樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度については、正逆家系の間に統計的な差異が認められなかった。特に容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度は、正逆家系の組合せ間に有意な正の相関が示された。このため、母樹能力として高いものは花粉親能力としても高く、母樹能力として低いものは花粉親能力としても低い傾向を示すことが示唆された。容積密度数および動的ヤング係数は、母樹および花粉親能力として G1 および L1 で高く、G3 および L3 で低い傾向を示した。繊維傾斜度では、母樹と花粉親能力として G2 および L3 が低い傾向を示した。容積密度数および動的ヤング係数は、共通した母樹と花粉親で高い値を示したが、繊維傾斜度における母樹と花粉親の能力が、容積密度数および動的ヤング係数と異なっているものと示唆される。従って、繊維傾斜度は、容積密度数および動的ヤング係数とは独立した形質であり、容積密度数が高く、繊維傾斜度の低い GL 品種の開発の可能性が期待される。

特定の交雑組合せによって、容積密度数および動的ヤング係数の優れた品種の作出の可能性があると考えられる。事業的に重要な GL において、若齢期に交雑組合せによる形質の変異が確認できたことは、育種年限の短縮につながると考えられる。また、母樹および花粉親の材質特性は遺伝することが示唆されるため、花粉親が特定できない自然受粉の採種園において、採種園の改良および採種に当たり、母樹 (グイマツ) および花粉親 (カラマツ) になる精英樹クローンの材質を考慮する必要があると考えられる。

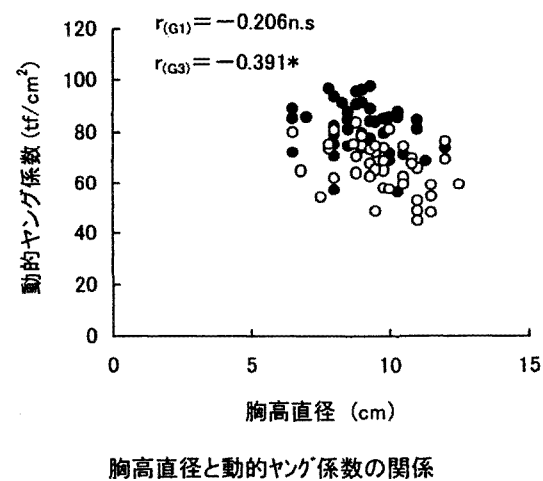
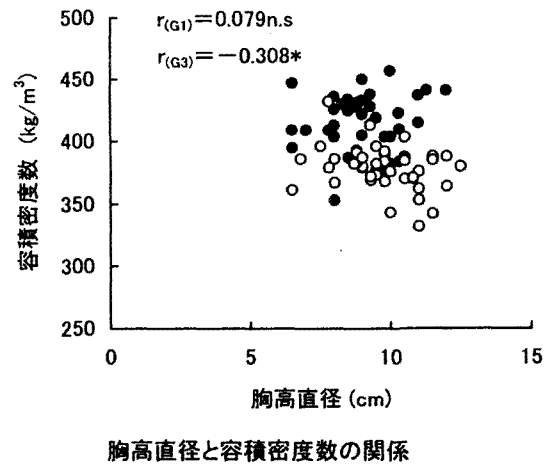
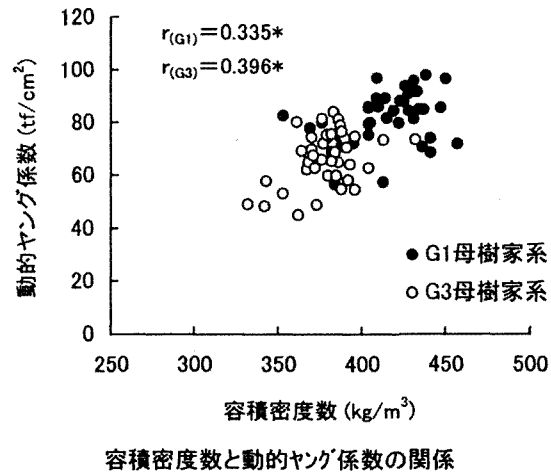


図 2-4-2 G1 母樹家系と G3 母樹家系における容積密度数, 動的ヤング係数および胸高直径の間の関係

$r_{(G1)}$ : G1 母樹家系の相関係数,  $r_{(G3)}$ : G3 母樹家系の相関係数。  
\*: 危険率 5% 水準で有意; n.s., 非有意。

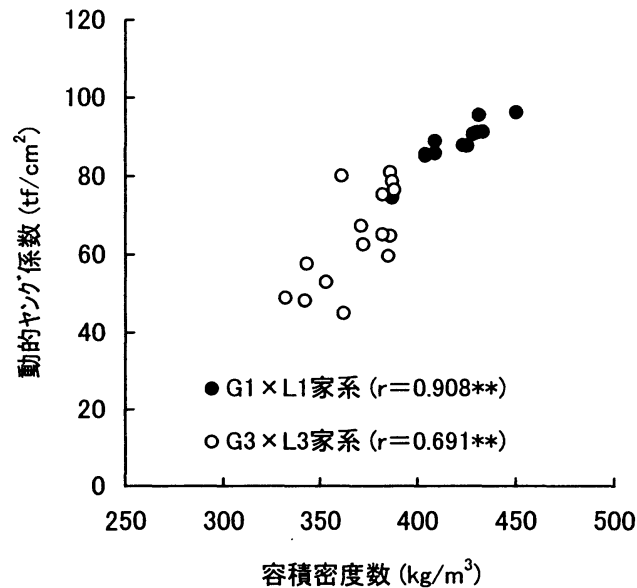


図 2-4-3 G1×L1 家系と G3×L3 家系における容積密度数と動的ヤング係数の関係

\*\* : 危険率 1 % 水準で有意。

#### 4. 3. 2 親子回帰による容積密度数の狭義の遺伝率の推定

人工交雑に用いたグイマツおよびカラマツの 7 クローンの概要と調査結果を、表 2-4-5 に示した。調査時点の林齢は、それぞれ 37 年と 40 年で、胸高直径の供試個体の平均は、25～36cm である。また、樹心部を髄から 10 年輪以内の部位、辺縁部を髄から 26 年輪の部位とした。容積密度数の範囲は樹心部で 425～493kg/m³、辺縁部で 417～555kg/m³ を示した。年輪幅は樹心部で 4.4～6.0mm、辺縁部で 1.8～3.2mm であった。樹心部は未成熟材に相当し、辺縁部は成熟材であると考えられる。

容積密度数および年輪幅について、樹心部と辺縁部の関係を図 2-4-4 に示した。容積密度数は、樹心部と辺縁部との間に有意な正の相関を示したが、年輪幅は、樹心部と辺縁部との間に有意な相関を示さなかった。

表 2-4-5 供試したグイマツとカラマツクローンの概要および測定結果

| 樹種   | クローン名 |    | 略号 | 林齡<br>(年) | 胸高直径<br>(cm) | 樹心部 |     | 辺縁部 |     |
|------|-------|----|----|-----------|--------------|-----|-----|-----|-----|
|      |       |    |    |           |              | Bd  | Arw | Bd  | Arw |
| グイマツ |       |    |    |           |              |     |     |     |     |
| 中標津  | 4     | G1 | 37 | 28        | 493          | 5.3 | 555 | 3.2 |     |
| 川北   | 4     | G2 | 37 | 29        | 456          | 4.7 | 459 | 2.4 |     |
| 留萌   | 1     | G3 | 37 | 29        | 437          | 6.0 | 466 | 3.0 |     |
| カラマツ |       |    |    |           |              |     |     |     |     |
| 諏訪   | 14    | L1 | 40 | 25        | 452          | 4.4 | 444 | 2.2 |     |
| 諏訪   | 16    | L2 | 40 | 25        | 461          | 4.9 | 445 | 2.6 |     |
| 遠野   | 1     | L3 | 40 | 25        | 425          | 5.3 | 417 | 1.8 |     |
| 十勝   | 43    | L4 | 37 | 36        | 467          | 5.0 | 429 | 2.9 |     |

樹心部は髄から 10 年輪以内の部位、辺縁部は髄から 26 年輪以降の部位を示す。  
Bd: 容積密度数(kg/m³), Arw: 年輪幅(mm)。

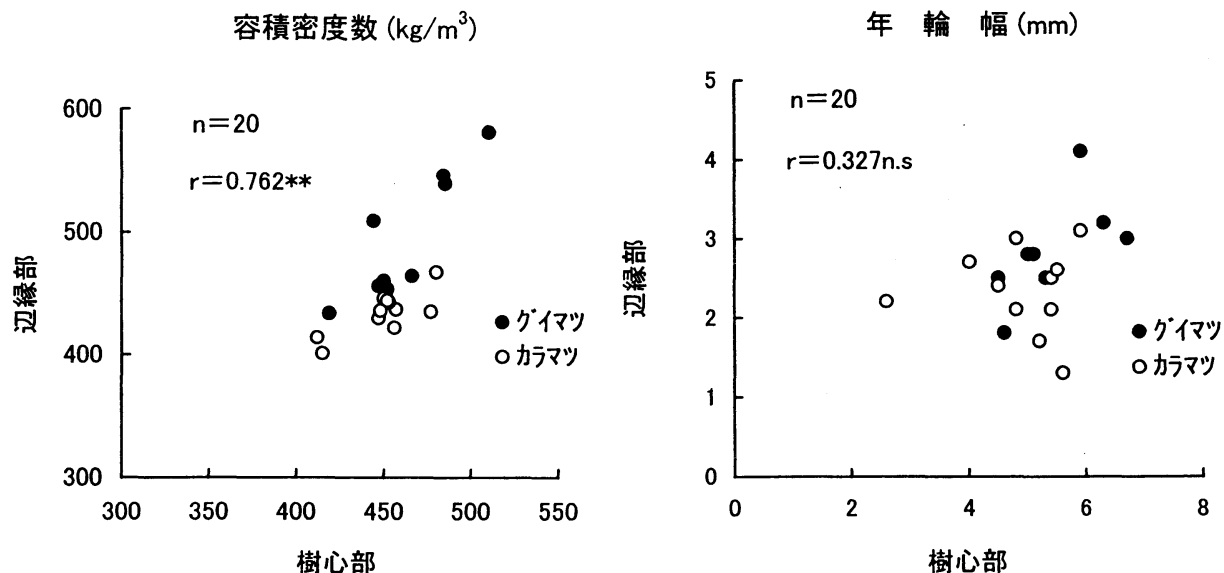


図 2-4-4 容積密度および年輪幅における樹心部と辺縁部の関係

n : クローン数, \*\* : 危険率 1 % 水準で有意, n.s : 非有意。  
樹心部 : 髄から 10 年輪以内の部位, 辺縁部 : 髄から 26 年輪以降の部位。

クローンを要因とした分散分析の結果を表 2-4-6 に示した。容積密度数は、樹心部および辺縁部でクローン間に危険率 1 % 水準で有意差が認められた。年輪幅は、辺縁部で危険率 5 % 水準でクローン間に有意差が認められたが、樹心部ではクローン間に有意差が示されなかった。このことから、供試クローンの容積密度数については、中標津 4 (G1) が最も高く、遠野 1 (I3) が最も低い値であることが統計的にいえる。このことは、表 2-4-1 および表 2-4-3 から考察した結果と同様であった。

次に、両親クローンと子供家系の相関関係を検討した。前述の正逆家系間の結果から、母樹および花粉親の能力に統計的な有意差が示されないため、グイマツ母樹とカラマツ花粉親の測定値 (表 2-4-5) から求めた平均値 (中間親) を子供家系 (GL 家系) の両親の値とし、子供家系の測定値との相関を調べた。子供家系である GL の 11 家系の平均容積密度数と平均年輪幅の測定結果を、表 2-4-7 に示した。GL 家系が未成熟材であるため、両親クローンは樹心部の値で検討した。

表 2-4-6 容積密度数および年輪幅におけるクローンを要因とした分散分析結果

| 形 質   | 自 由 度 |       | 平 均 平 方  |         | 分 散       |
|-------|-------|-------|----------|---------|-----------|
|       | クローン間 | クローン内 | クローン間    | クローン内   |           |
| 容積密度数 |       |       |          |         |           |
| 樹心部   | 6     | 13    | 1410.117 | 204.192 | 6.906 **  |
| 辺縁部   | 6     | 13    | 6057.897 | 425.782 | 14.228 ** |
| 年輪幅   |       |       |          |         |           |
| 樹心部   | 6     | 13    | 0.806    | 0.753   | 1.070 n.s |
| 辺縁部   | 6     | 13    | 0.703    | 0.236   | 2.978 *   |

\*\* : 危険率 1 % 水準で有意, \* : 危険率 5 % 水準で有意, n.s : 非有意。  
樹心部は髄から 10 年輪以内の部位, 辺縁部は髄から 26 年輪以降の部位を示す。

表 2-4-7 GL11 家系における容積密度数および年輪幅の測定結果

|               |      | 花 粉 親 (カラマツ) |     |     |     |     |     |     |     |      |     |
|---------------|------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
|               |      | L1           |     | L2  |     | L3  |     | L4  |     | Avg. |     |
|               |      | Bd           | Arw | Bd  | Arw | Bd  | Arw | Bd  | Arw | Bd   | Arw |
| 母 樹<br>(ゲイマツ) | G1   | 419          | 5.8 | 420 | 6.2 | 403 | 6.0 | ×   | ×   | 414  | 6.0 |
|               | G2   | 398          | 5.6 | 413 | 6.1 | 395 | 5.8 | 384 | 6.1 | 398  | 5.9 |
|               | G3   | 386          | 6.0 | 383 | 6.6 | 369 | 6.3 | 375 | 6.8 | 378  | 6.4 |
|               | Avg. | 401          | 5.8 | 405 | 6.3 | 389 | 6.0 | 380 | 6.5 | 397  | 6.1 |

Bd:容積密度数(kg/m<sup>3</sup>), Arw:年輪幅(mm), Avg.:平均値。

×:未交雑のため, 家系が現存しない。

交雑組合せの略号は, 表2-3-1参照。

容積密度数における親子関係を図 2-4-5 に示した。両親と子供家系との間に, 相関係数が 0.764 の有意な正の相関 ( $p < 0.01$ ) が示された。親子回帰から推察される狭義の遺伝率は, 両親クローンの平均値に対する子供家系の平均値の回帰係数として得られる (松尾, 1978)。両親クローンの平均値の分散 180kg/m<sup>3</sup> と子供家系の測定値の分散 303kg/m<sup>3</sup> に差異があるため, 中間親と子供家系の偏差平方和に基づいて算出される補正係数を乗じて標準化し (Wright, 1976), 遺伝率を推定した。本研究において推定した遺伝率は, 0.66 であった。大島・黒丸 (1995b) は, GL の狭義の遺伝率を分散分析から 0.55 と推定していることから, GL の容積密度数は, 母樹と花粉親の容積密度数に関する特性が遺伝していると示唆され, 育種的な改良効果が高いことが期待される。

一方, 年輪幅における両親と子供家系の関係は, 有意な相関を示さなかった (図 2-4-6)。その要因のひとつは, 本調査に供試したクローンでは, 樹心部でクローン間に有意差が認められなかったためと推察される。

我が国の主要な造林樹種について, 若熟期における実生家系の狭義の遺伝率を推定した研究で, 藤澤 (1998) は, スギの林齢 19 年の人工交配家系について, 狭義の辺材容積密度数でほぼ 0, そしてヤング係数で 0.14 と報告してい

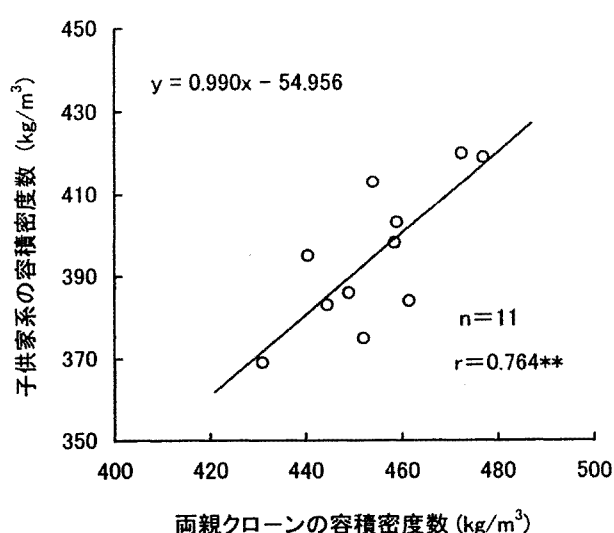


図 2-4-5 容積密度数における両親クローンと子供家系の関係

n:家系数, \*\*危険率 1%水準で有意。

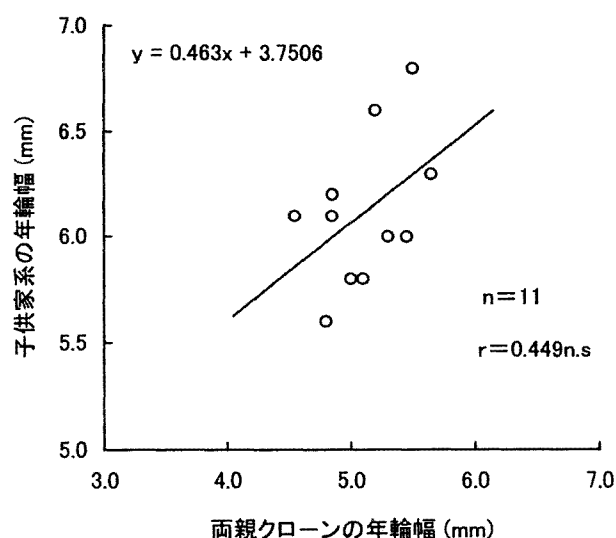


図 2-3-6 年輪幅における両親クローンと子供家系の関係

n:家系数, n.s:非有意。

る。狭義の遺伝率の低い理由として、スギの容積密度数については、特定組合せ能力が高いことが特徴である可能性を指摘している。特定組合せ能力とは、特定の交雑組合せにおいて特に高い、または低い能力を示すことである。特定組合せの能力が高い場合、容積密度数の高い両親の交配において、子供家系の容積密度数が必ずしも高いことが期待されない。また小泉ら(1990b)は、カラマツの林齢18年の曲げヤング係数では、自然交配家系と両親クローンとの間に有意な相関が示されないことを報告している。その理由として、供試林が若齢であることを指摘している。一方、大島(1998)は、カラマツの林齢19年の人工交配家系について、容積密度数は一般組合せ能力が高く、狭義の遺伝率を分散分析から0.61~0.83、親子回帰から0.57~0.69と比較的高い値を推定し、容積密度数を早期検定できる可能性を報告している。一般組合せ能力とは、多くの交雑組合せにおいて示す平均の能力のことであり、種子繁殖による林木育種では一般組合せ能力が高いことが重要で、その値の高い個体を選抜することにより、その形質の優良遺伝子の集積を図ることができる(山本・大庭, 1991)。

本調査における林齢9年のGLの容積密度数は、親子の間に有意な相関を示し、推定された狭義の遺伝率が0.66と比較的高い値を示したことから、容積密度数では一般組合せ能力が高いと推察される。従って採種園の改良に当たり、容積密度数の低いグイマツ精英樹クローンおよびカラマツ精英樹クローンを除去することで、容積密度数の高い次代の種苗の生産が可能であると考えられる。

#### 4.4 要 旨

若齢のグイマツとカラマツ精英樹クローンを用いた人工交雑で得た正逆家系の成長と材質諸形質の特徴、そしてグイマツ雑種F<sub>1</sub>家系における材質育種の可能性と方向性について検討した。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) GLおよびLGの樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数、繊維傾斜度については、完全ダイアレルクロスによる正逆の交雑組合せ間に有意差が認められなかった。材質形質である容積密度数、動的ヤング係数、繊維傾斜度については、交雑正逆家系の間に有意な正の相関が示された。このため、母樹能力の高いものは花粉親能力としても高い傾向を示し、花粉親能力の低いものは、母樹能力としても低い傾向があることが示唆された。
- (2) 容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度の材質形質は、成長形質と比べて遺伝性が高いと推察され、これらの形質では、母樹および花粉親の特性の平均値が子供家系に遺伝することが示唆された。従って採種園を改良するに当たり、精英樹クローンの材質特性に基づいて、材質不良クローンを除去することが必要である。
- (3) 両親クローンの平均値とその子供家系の関係については、容積密度数で有意な正の相関( $r=0.764^{**}$ )が示された。親子回帰から推察された狭義の遺伝率は、0.66と比較的高い値を示した。一方、年輪幅については、両親クローンとその子供家系との間に有意な相関が認められなかった。従って容積密度数の育種的な改良効果は、年輪幅と比べて高いことが期待される。
- (4) 事業的に重要なGLについて、交雑組合せによる形質の変異が若齢期において確認できたことは、育種年限の短縮につながるものと期待される。また特定の交雑組合せにより、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度の優れた品種の開発の可能性があると考えられる。本研究において、グイマツ中標津4(G1)とカラマツ諏訪14(L1)の交雑家系(G1×L1)は、高い容積密度数と動的ヤング係数を示した。

## 第5節 総括

グイマツ雑種F<sub>1</sub>の材質に関する優良品種を開発するための基礎的な知見を得ることを目的として、グイマツおよびカラマツの植栽木、採種園の精英樹クロンの容積密度数および若齢の実生家系の成長と材質諸形質に関して調査した。得られた結果から、以下の結論を得た。

- (1) グイマツおよびカラマツは、アカエゾマツ、トドマツ、ドイツトウヒ、カナダトウヒ、ヨーロッパアカマツおよびストロブマツと比べて、容積密度数が高い値を示した。半径方向の変動では、グイマツ、カラマツともに容積密度数は髄周辺で最も低く、年輪幅は髄周辺で最も高い値を示した。また容積密度数では、樹心部と辺縁部との間に高い正の相関が得られ、樹心部の容積密度数から、個体あるいはクロンの容積密度数を比較的早期に評価できる可能性が示唆された。
- (2) 容積密度数は、年輪幅および晩材率に比べて反復率が高く、グイマツで0.80～0.87、カラマツで0.51～0.56を示した。GIの母樹と花粉親の容積密度数は、遺伝性が高いと推察されるため、両親について、容積密度数に関する育種的な改良効果のあることが期待される。
- (3) カラマツは、グイマツと交雑することで樹高、胸高直径、根元曲り、幹曲り、容積密度数、動的ヤング係数および野ねずみの食害程度に改良効果のあることが示唆された。しかし繊維傾斜度については、改良効果は示されなかった。特にカラマツでは、野ねずみに食害されやすいことが造林樹種として重大な欠点であるといえる。
- (4) グイマツとカラマツの種間雑種であるGIおよびIGの樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数、繊維傾斜度について、完全ダイアレルクロスによる正逆の組合せの間に有意差が認められなかった。また、材質形質である容積密度数、動的ヤング係数、繊維傾斜度については、母樹能力の高いクロンは花粉親能力としても高く、花粉能力の低いクロンは母樹能力としても低い傾向があることが示唆された。
- (5) 容積密度数および動的ヤング係数は、繊維傾斜度と独立した形質であることが示唆されたため、容積密度数および動的ヤング係数が高く、繊維傾斜度の小さいGI品種の開発の可能性が期待される。また、これらの材質形質は、母樹および花粉親の特性の平均値が子供家系に遺伝することが示唆されたことから、精英樹クロンの材質特性に基づいた採種園における不良クロンの除去、間伐および採種が重要となる。これにより、優れたGI種苗の供給が可能であると期待される。
- (6) GIにおける両親クロンの平均値とその子供家系の関係については、容積密度数で有意な正の相関を示し、親子回帰から推察された狭義の遺伝率は、0.66と比較的高い値を示した。しかし年輪幅では、両親クロンの平均値とその子供家系の間に有意な相関を示さなかった。従って容積密度数に関しては、特定の交雑組合せにより優れた品種の開発の可能性が期待できる。本研究においては、グイマツ中標津4 (G1) とカラマツ諏訪16 (I.1) の交雑家系 (G1×I.1) は、容積密度数と動的ヤング係数が高い値を示した。また若齢のGIについて、交雑組合せによる形質の変異が確認できたことで、育種年限の短縮につながるものと推察される。

## 第3章 アカエゾマツの材質と遺伝変異

### 第1節 従来の研究および本研究の目的

戦後、北海道において積極的に行われた拡大造林で植栽された樹種は、国有林、道有林でトドマツ、一般民有林でカラマツが主体であった。近年、造林面積が全体的に減少傾向にあるなかで、造林樹種は、諸害に強いアカエゾ

マツ (*Picea glehnii*) に転換されている (北海道林務部, 1995)。このため、アカエゾマツは造林の歴史が浅く、造林木の材質特性が不明のまま造林されている。またアカエゾマツは、蛇紋岩地帯、火山泥流跡や火山灰礫地などの特殊な土壌環境下に純林を形成する特徴があり、針広混交林を構成することは少なく、生態的に特異な樹種といわれている (館脇, 1943)。このことから、造林樹種としての成長、環境適応性、材質および気象害や病虫獣害に対する抵抗性などの特性を明らかにする必要がある。

近年、我が国では住宅建築様式の変化に伴い、外国産トウヒについては欧州からドイツトウヒ (*P. abies*) の寸法仕上げ材が、また、北米から SFP 材としてカナダトウヒ (*P. glauca*) が輸入されている (西村, 1998)。今後、国内においてスプルース材の需要がさらに伸びることが見込まれるが、天然林の北海道産のスプルース材、アカエゾマツとクロエゾマツ (*P. jezoensis*) の良材は、資源的制約や環境保全的観点から激減している。成長が遅く、霜害を受けやすいクロエゾマツは造林量が極めて少ないため、アカエゾマツが主要な造林樹種になっている。将来、アカエゾマツの造林木の木材が、市場に出ることが予想される。しかしながら、アカエゾマツの成長・材質特性は、未だ明らかにされていない。従って、まずアカエゾマツ造林木の材質特性を把握すること、また造林木として優れた種苗の確保・供給に向けて、精英樹クローンの成長特性を明らかにするとともに、それらの材質特性、遺伝変異および材質に関する産地間変異を把握することが必要である。

アカエゾマツの造林木については、未成熟材部の範囲が髓から 15～21 年、その距離が 5.9～7.8cm であること、強度的性質および材密度で、天然木との間にほとんど差が見られないこと (川口ら, 1986a)、実大サイズでの曲げ強度の性能が、現行の建築基準法の基準値を十分に満たしていること (川口ら, 1986b)、さらに優勢木では、強度的性質はトドマツ天然木よりも劣るが、トドマツ造林木と同程度であること (安久津, 1997) が報告されている。また、同一林地 (苫小牧営林署 303 林班: 苫小牧市) に植栽された 41 年生のアカエゾマツ、クロエゾマツおよびトドマツの比較において、アカエゾマツは胸高直径が最も大きく、容積密度数がクロエゾマツとトドマツの中間的な値を示した (飯塚ら, 2000b)。

Rozenberg と Cahalan (1997) は、欧州および北米におけるトウヒ属の材質に関する遺伝育種学的研究を行い、材密度の広義および狭義の遺伝率が高いこと、そして産地間変異が存在することを報告している。一方、国内において、材質育種的な観点から、千葉・永田 (1991) は造林木から高容積密度個体の選抜を行い、千葉ら (1991) と野堀ら (1991) は、軟 X 線デンストメトリ法による材質解析の結果、容積密度数を高める要因として、早材部容積密度と晩材率が同時に影響することを明らかにした。また、精英樹クローンを用いた材質解析により、容積密度数、年輪幅、縦圧縮強度、動的ヤング係数、繊維傾斜度にクローン間で有意差が認められ、さらに、材質形質に産地間変異のあることが示唆された (安久津・飯塚 1997, 1998; 飯塚ら 1994b, 1995, 1997, 1998)。容積密度数の樹幹内変動については、髓から 25 年輪までの半径方向では、髓周辺の容積密度数が最も高く、辺縁部に向かうに従って安定する傾向がある。胸高部位で容積密度数の高いクローンは、他の樹高部においても容積密度数が高く、辺縁部においても、容積密度数が減少しない傾向があることが報告されている (飯塚ら, 1997, 1998)。そのクローンでは晩材率が高く、早材部容積密度数が高いことが確認されている (安久津・飯塚 1998)。節枝については、節枝数にクローン間で有意差が認められ、節枝径と胸高直径の間に有意な正の相関が示された。また、枝の枯れ上がりが悪く、枯枝が自然落下し難いため、材に死節が出現し易いことが指摘されている (飯塚ら 1996b, c)。

本章では、従来の研究を踏まえて、アカエゾマツの材質育種についての基礎的な知見を得る目的で、成長特性を考慮しながら材質変異に関する調査・研究を進めた。まず第 2 節では、採種木に用いる精英樹クローンの基本的な

木材の性質について議論する。基本的な木材の性質として、容積密度数、動的ヤング係数、節枝形質について調査し、さらに、それらの形質の産地間差を検討した。次に第3節では、複数の採種園に植栽されている精英樹クローンの樹高、胸高直径、クローネ幅および容積密度数について、反復率、形質間の相互関係、採種園間の交互作用および相互関係を解析した。第4節では、複数の産地から採種された苗木により設定された試験地を用いて、成長および容積密度数に関する産地間変異を検討した。最後に第5節では、得られた結果に基づき、アカエゾマツの材質変異を総括した。

## 第2節 精英樹クローンの基本的な木材の性質

### 2.1 はじめに

アカエゾマツ育種種苗の供給と普及の向上を図るため、また人工交配を行うための母材の特性を把握する目的で、精英樹クローンの材質に関する特性調査を行った。

本節では精英樹53クローンについて、容積密度数、動的ヤング係数および節枝形質について、クローン間変異、形質間の相互関係および産地間変異を検討した。

### 2.2 材料と方法

#### 2.2.1 材料

材料のアカエゾマツ精英樹クローンは、札幌市近郊の江別市にある林木育種センター北海道育種場の育種素材保存園（以下、「保存園」という。）から供試した。保存園では、精英樹クローンは1963年から1966年に平坦地（一部は緩傾斜地）に、苗間が2 m、列間が4 m間隔の1,250本/ha、1クローン当たり15本を基本にしてクローン単位の列条で植栽されている。材料は1994年、1995年の秋および1997年の春に、1本おきに伐採した初回間伐木から、林縁木と生育不良木を除いた個体を供試した。1クローンにつき3本を基本として、53クローン167個体を供試した。それぞれの供試個体では、林分内の位置における生育環境の差は少ないと考えられた。平均林齢は32（±2）年で、平均樹高が9.8（±1.3）m、平均胸高直径が19.0（±2.8）cm、胸高部位の平均年輪数は25（±2）年であった。

#### 2.2.2 容積密度数の測定

供試した材料の胸高部位から、厚さ10cmの円板を採取した。容積密度数の測定は、秤量法で行った（加納, 1973a）。供試した円板の髄を頂点とした扇形試験片（中心角30度）を切り出し、髄から5年輪単位の試験体を作製し、容積密度数と年輪幅を測定した。容積密度数（Bd）は、53クローン167個体について生材体積を水中浮力法で求め、次式により求めた。

$$Bd \text{ (kg/m}^3\text{)} = W_o / V_g \times 1000$$

W<sub>o</sub>: 全乾重量 (g), V<sub>g</sub>: 生材体積 (cm<sup>3</sup>)。

#### 2.2.3 動的ヤング係数の測定

供試した丸太について、地上高2 mから4 mの部位を材長2 mに採材し、生材丸太の動的ヤング係数を測定した。丸太の一端をプラスチックハンマーで打撃し、他端で打撃音をマイクロフォンで収録し、打撃音の一次固有振動数

から動的ヤング係数を算出した。生材丸太の密度は、平均断面積式により丸太の元口径と末口径から求めた、丸太の平均径と材長の積および生材丸太重量から算出した。FFTアナライザー（小野測器 CF-1200）を用いて求めた一次の固有振動数から、動的ヤング係数（Ed）を次式により計算した。

$$E_d = (2fL)^2 \times \rho / g$$

Ed：動的ヤング係数（tf/cm<sup>2</sup>），f：一次固有振動数（Hz），L：材長（cm）， $\rho$ ：生材丸太の密度（g/cm<sup>3</sup>），g：重力加速度（980cm/s<sup>2</sup>）。

#### 2.2.4 節枝形質の測定

動的ヤング係数を測定した丸太では、枝打ちは行われておらず、枝の枯れ上がりが観察されなかったため、全ての節枝は生節枝と判断した。節枝形質については、節枝径、1 m 当たりの節枝数（以下、「節枝数」という。）、輪生枝上の節枝数、節枝径比率および節枝面積率の5形質を測定した。測定は、素材の日本農林規格14条に関する素材の欠点の節の測定方法（北海道林産物検査会，1987）に基づき、節ばかまを除いた幹との接線径が1 cm 以上の全ての節枝について行った。また、輪生枝間の節間中に出現した節枝については、同一年に形成された輪生枝の節枝数に含めた。なお、節枝径（cm）は、「接線径をその節枝径とした全節枝径」/「全節枝数」、輪生枝の節枝数（本）は、「全節枝数」/「全輪生枝数」、節枝径比率（%）は、「輪生枝の節枝数と平均節枝径の積」/「幹周囲長」×100、そして節枝面積率（%）は、「平均節枝径から算出した節枝面積と全節枝数の積」/「幹全表面積」×100としてそれぞれ算出した。

#### 2.2.5 形質の産地間比較

産地間の比較は、精英樹が選抜された当時の営林署の管轄区域である中頓別、士別、阿寒、本別、陸別および弟子屈の6産地について行った（図3-2-1）。供試した53クローンの中で、1産地3クローン以上の計6産地38クローンを対象にした。検討項目は、胸高部位における16年輪以降の容積密度数と年輪幅、動的ヤング係数、比動的ヤング係数（動的ヤング係数/胸高部位の16年輪以降の容積密度数）および節枝数の5形質とした。

### 2.3 結果と考察

#### 2.3.1 容積密度数

容積密度数と年輪幅について、髄から樹皮に向かう半径方向の変動を図3-2-2に示した。容積密度数は、髄周辺で430kg/m<sup>3</sup>と高く、年輪数が増加するに従って減少し、16年輪以降は350kg/m<sup>3</sup>前後で安定する傾向が見られた。しかし、高容積密度数を示す精英樹クローンの中には、年輪数が増加しても容積密度数が400kg/m<sup>3</sup>前後で推移するパターンも報告されている（飯塚ら，1997，1998）。一方、アカエゾマツ（野堀ら，1991）および外国産トウヒ属のドイツトウヒ（Bendsen et al., 1994）とカナダトウヒ（Taylor et al., 1982）の容積密度数について、髄から50年輪以上の半径方向の推移では、髄周辺が高く、その後減少するが、年輪数が増加するに従って増加することが知られている。本研究の供試個体では、平均年輪数が25年輪以下であったため、容積密度数が減少した部位までの測定結果となっていると推察される。年輪幅は髄周辺が最も狭く、11年輪以降では4mm前後で推移した。

容積密度数と年輪幅の測定結果およびクローンを要因とした分散分析の結果を、表3-2-1に示した。全ての測定部位の容積密度数と年輪幅で、クローン間に危険率1%水準で有意差が認められた。クローン間分散とクローン内分散

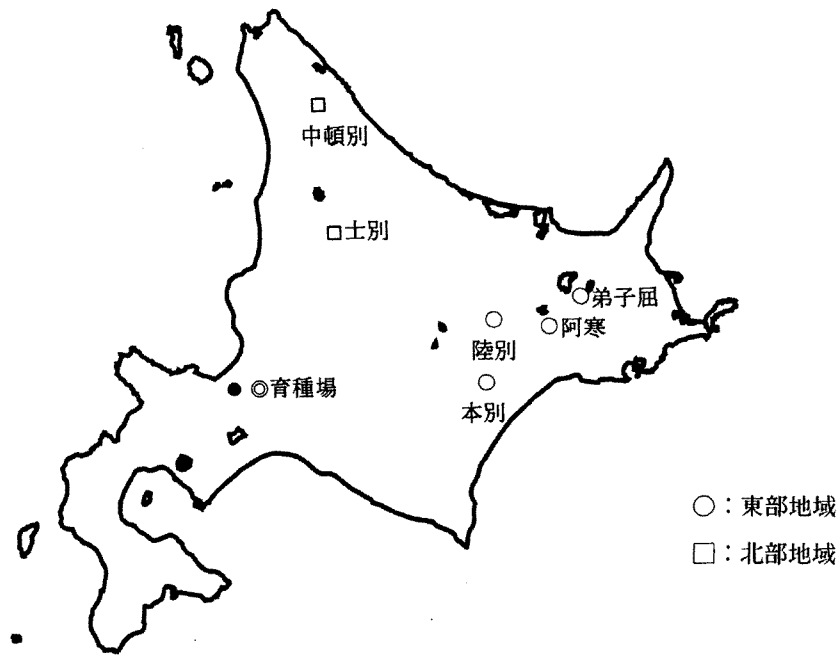


図 3-2-1 産地の位置図

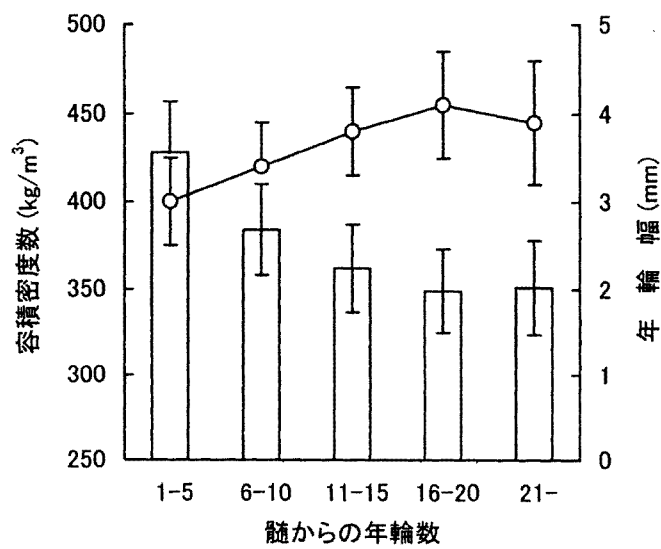


図 3-2-2 容積密度数と年輪幅の半径方向の変動

□ 容積密度数    —○— 年輪幅

垂直線の範囲：標準偏差。

表 3-2-1 容積密度数と年輪幅における分散分析結果

| 形 質   | 測定部位<br>(髄からの年輪数) | 自 由 度 |       | 平 均 平 方  |         | 分散比       |
|-------|-------------------|-------|-------|----------|---------|-----------|
|       |                   | クローン間 | クローン内 | クローン間    | クローン内   |           |
| 容積密度数 | 1 - 5             | 52    | 114   | 2670.074 | 731.280 | 3.651 **  |
|       | 6 - 10            | 52    | 114   | 2113.445 | 337.175 | 6.268 **  |
|       | 11 - 15           | 52    | 114   | 2001.622 | 271.969 | 7.360 **  |
|       | 16 - 20           | 52    | 114   | 1903.486 | 122.621 | 15.523 ** |
|       | 21 -              | 52    | 114   | 2333.648 | 120.192 | 19.416 ** |
| 年輪幅   | 1 - 5             | 52    | 114   | 0.860    | 0.248   | 3.468 **  |
|       | 6 - 10            | 52    | 114   | 0.773    | 0.215   | 3.600 **  |
|       | 11 - 15           | 52    | 114   | 0.916    | 0.287   | 3.190 **  |
|       | 16 - 20           | 52    | 114   | 0.976    | 0.377   | 2.589 **  |
|       | 21 -              | 52    | 114   | 1.479    | 0.403   | 3.669 **  |

\*\*：危険率1%水準で有意。

の比で示される分散比は、クローン間における有意差の有無の判定基準になる。クローン間のばらつきが大きく、クローン内の個体のばらつきが少ない場合、分散比が高くなり、クローン間変異が大きいと判断される。それぞれのクローンの各個体で、生育環境による影響の差が無視できる場合、その変異は遺伝的要因の寄与に基づいていると考えられる。容積密度数は、髄周辺で分散比が3.65を示したが、16年輪以降では、分散比が15以上と高い値を示した。年輪幅は、いずれの測定部位においても分散比が3.7以下であった。従って容積密度数は、年輪幅と比べて分散比が高いため、遺伝的要因の寄与が高いと考えられる。さらに辺縁部の容積密度数は、髄周辺の樹心部の容積密度数と比べて遺伝的要因の寄与が高いといえる。

ドイツトウヒの髄周辺における容積密度数の高い要因は、幼齢期における圧縮あて材の形成と関連していることが報告されている (Lindström, 1996b)。本研究において、アカエゾマツの容積密度数は髄周辺で高い値を示しており、髄周辺では、風雪等の影響で圧縮あて材が形成されている可能性が考えられる。また、髄周辺で高い容積密度数を示す他の要因として、年輪幅が狭いため晩材率が高いこと、早材部容積密度数が高いこと、単位体積当たりに占める細胞壁率の高い細胞数が多いことなどが考えられる。

### 2.3.2 動的ヤング係数および節枝形質

北海道産の針葉樹丸太について、打撃音法による動的ヤング係数は、静的曲げヤング係数とほぼ同等の精度で曲げ強度を推定できることが報告されている (藤原・工藤, 1993)。本報告では、材長2mの生材丸太を対象にして、動的ヤング係数および節枝形質を測定した。各形質の測定結果とクローンを要因とした分散分析の結果を、表3-2-2に示した。動的ヤング係数および各節枝形質でクローン間に危険率1%水準で有意差が認められた。

動的ヤング係数は平均で97.7tf/cm<sup>2</sup>となり、最も低いクローンで68.5tf/cm<sup>2</sup>、最も高いクローンで131.6tf/cm<sup>2</sup>と大きなバラツキが見られた。節枝径は、平均2.0cmであった。節枝数は1m当たりの節枝数の平均は14.3本となり、最も少ないクローンで10.1本、最も多いクローンで20.0本と大きなバラツキが見られた。節枝数については、精英樹クローンにおいて、樹高および胸高直径との間に相関が認められないことから、成長形質と独立した形質である可能性が推察されており、また、一年間隔に節枝が規則的に輪生状に形成されるクローンと、節枝が輪生状およびその節間中にも不規則に出現するクローンがあることが報告されている (飯塚ら, 1996b,c)。このため節枝数の多

表 3-2-2 動的ヤング係数および節枝形質の測定結果と分散分析結果

| 形 質                           | 測 定 結 果 |       |      | 分 散 分 析 結 果 |       |         |        |          |
|-------------------------------|---------|-------|------|-------------|-------|---------|--------|----------|
|                               | Avg.    | Max.  | Min. | 自 由 度       |       | 平 均 平 方 |        | 分散比      |
|                               |         |       |      | クローン間       | クローン内 | クローン間   | クローン内  |          |
| 動的ヤング係数 (tf/cm <sup>2</sup> ) | 97.7    | 131.6 | 68.5 | 52          | 114   | 378.340 | 53.513 | 7.070 ** |
| 節枝径 (cm)                      | 2.0     | 2.7   | 1.5  | 52          | 114   | 0.338   | 0.045  | 7.511 ** |
| 節枝数 (本)                       | 14.3    | 20.0  | 10.1 | 52          | 114   | 20.950  | 6.842  | 3.062 ** |
| 輪生枝の節枝数 (本)                   | 5.0     | 6.3   | 3.6  | 52          | 114   | 1.334   | 0.377  | 3.568 ** |
| 節枝径比率 (%)                     | 20.4    | 30.7  | 11.0 | 52          | 114   | 92.202  | 10.549 | 8.740 ** |
| 節枝面積率 (%)                     | 1.0     | 1.9   | 0.4  | 52          | 114   | 0.612   | 0.083  | 7.373 ** |

Avg.: 平均値, Max.: 最大値, Min.: 最小値。

節枝数: 材長1m当たりの節枝数。

\*\*: 危険率1%水準で有意。

少は、樹高成長と関連があると推察される節間の長短というよりは、節間中における節枝の出現に影響を受けていると考えられる。本研究においても、節枝数の多いクローンでは、節間中における節枝が出現する傾向が見られた。輪生枝の節枝数は平均で5.0本、節枝径比率は平均で20.4%および節枝面積率は平均で1.0%であった。輪生枝では、単位材面に集中して現れる集中節になり、強度に与える影響が大きい。また、木材内に存在する節は材の割れ、反り、加工性、割裂性に影響を与え、強度を弱めるとともに、節の大きさと位置、分布は構造材の許容応力に重大な関係がある（太田，1994）。節枝数、輪生枝が少なく、節枝径の小さな個体は木材利用上、有利になることが示唆されるため、節枝形質の明らかなクローンを用いた人工交配を行い、それらの遺伝的特性を把握する必要がある。

### 2.3.3 形質間の相互関係

胸高部位の容積密度数と年輪幅について、髄から15年輪以内の部位（樹心部）と16年輪以降の部位（辺縁部）に区分して相互関係を検討した。容積密度数および年輪幅の樹心部と辺縁部の関係を図3-2-3に示した。両部位の関係は、容積密度数の相関係数が0.711、年輪幅の相関係数が0.535となり、それぞれ有意な正の相関を示した。容積密度数と年輪幅間の関係を図3-2-4に示した。樹心部の相関係数が-0.557、辺縁部の相関係数が-0.530と、それぞれ有意な負の相関を示し、直径成長の良好なクローンは、容積密度数が低くなる傾向を示した。アカエゾマツの容積密度数を高める要因としては、早材部容積密度数が知られており、林齢57年生と27年生時点での早材部容積密度数に有意な正の相関が認められている（野堀ら，1991）。この林齢57年生と27年生時点の部位は、髄から46年輪目と16年輪目に相当する部位と推察される。本研究においては、15年輪目で区分した樹心部と辺縁部ととの間の容積密度数に、高い正の相関が認められた。従ってアカエゾマツに関しては、髄周辺で圧縮あて材が形成され易いことから、髄周辺を除く15年輪数以下の部位において、容積密度数を評価できる可能性が高いものと推察される。

動的ヤング係数については、丸太径と動的ヤング係数との間に、相関係数-0.296の負の相関（ $p < 0.05$ ）が示された（図3-2-5）。また、動的ヤング係数と胸高部位の辺縁部の容積密度数との間に、相関係数0.696の正の相関（ $p < 0.01$ ）が示された（図3-2-6）。動的ヤング係数と節枝形質との相互関係については、節枝数との間に相関係数-0.277の負の相関（ $p < 0.05$ ）が認められたが、その他の節枝形質との間に有意な相関は得られなかった（表3-2-3）。動的ヤング係数を目的変数とし、容積密度数と節枝数を説明変数とする重回帰分析の結果、重相関係数が0.767となり、動的ヤング係数を推定する精度が向上した。このため、生材丸太の動的ヤング係数は、容積密度数と節枝数の

影響を受けていると考えられるため、早期に枝打ちを行うことで、動的ヤング係数を高める効果があるものと示唆される。

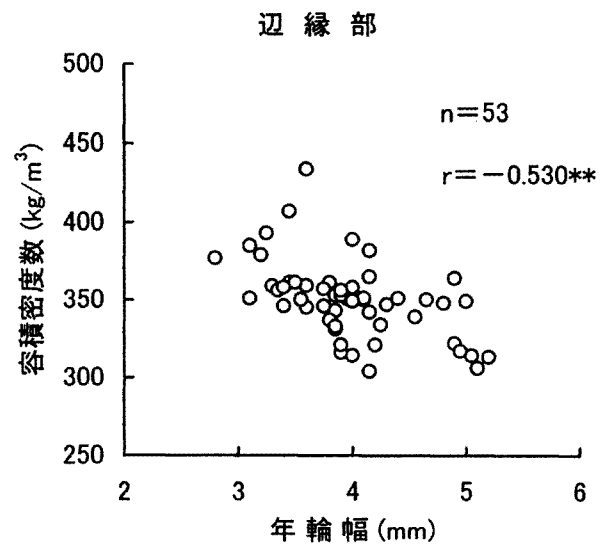
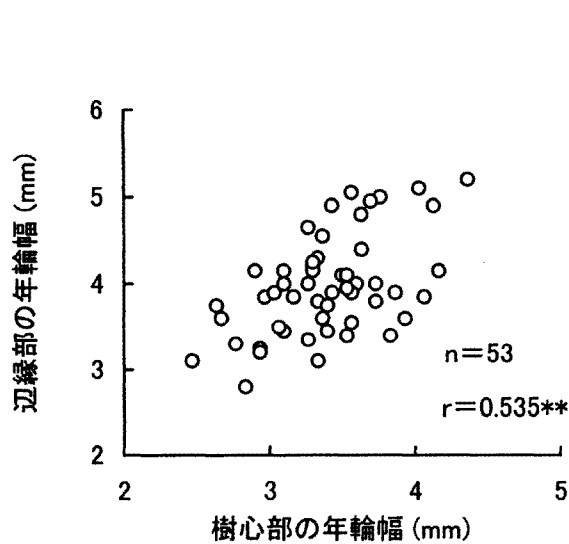
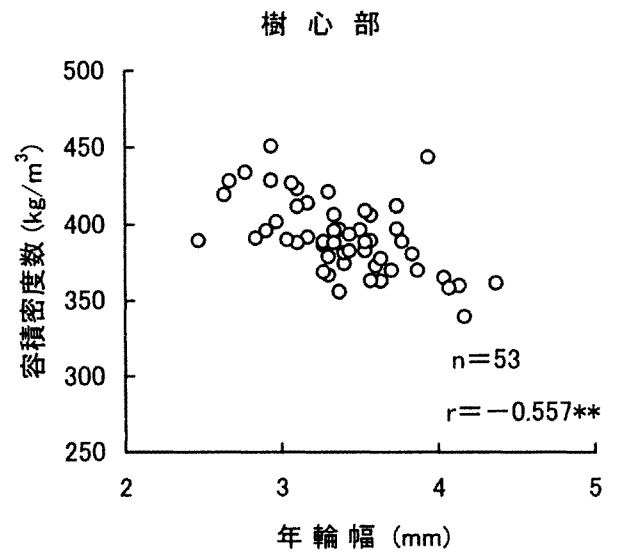
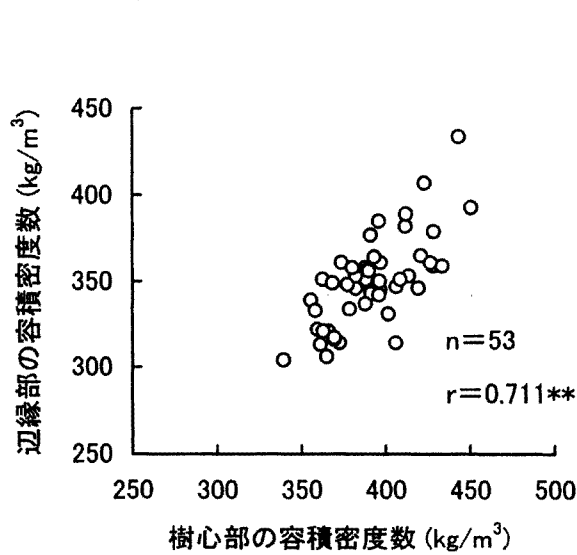


図3-2-3 容積密度数および年輪幅における樹心部と辺縁部の関係

$n$  : クローン数,  $^{**}$  危険率1%水準で有意。

図3-2-4 樹心部および辺縁部における年輪幅と容積密度数の関係

$n$  : クローン数,  $^{**}$  危険率1%水準で有意。

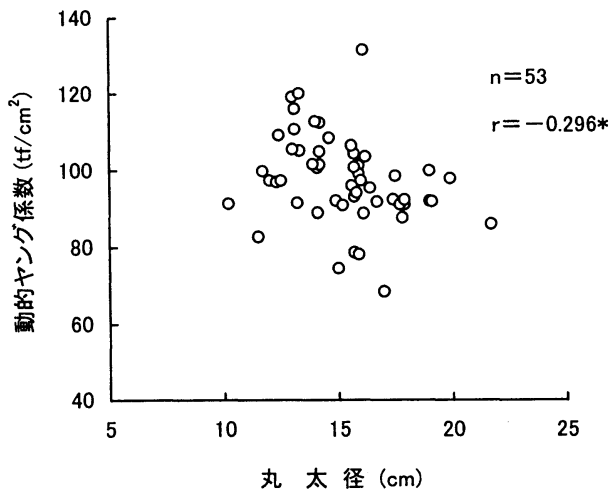


図 3-2-5 丸太径と動的ヤング係数の関係

n: クローン数, \*危険率5%水準で有意。

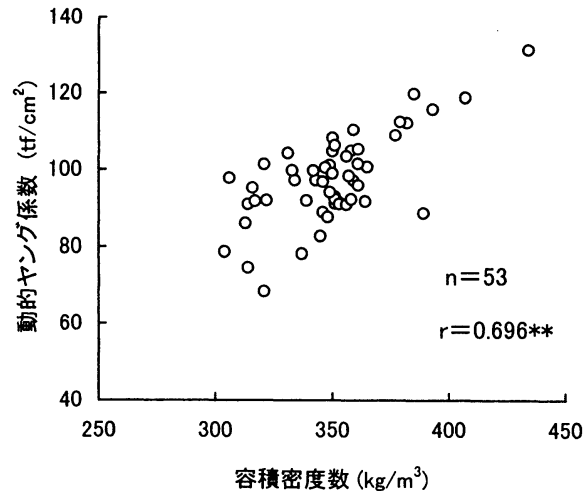


図 3-2-6 容積密度数と動的ヤング係数の関係

n: クローン数, \*危険率1%水準で有意。

表 3-2-3 動的ヤング係数と節枝形質との間の相関係数

| 節枝径        | 節枝数      | 輪生枝の節枝数    | 節枝径比       | 節枝面積率      |
|------------|----------|------------|------------|------------|
| -0.130 n.s | -0.277 * | -0.236 n.s | -0.003 n.s | -0.061 n.s |

\*: 5%水準で有意, n.s: 非有意。

#### 2.3.4 形質の産地間比較

精英樹が選抜された産地間の特徴を検討するため、胸高部位の辺縁部の容積密度数と年輪幅、動的ヤング係数、比動的ヤング係数および節枝数の5形質について検討した。それぞれの産地の所在地を図3-2-1に示した。各形質について、産地を要因とした分散分析の結果を表3-2-4に示した。容積密度数、年輪幅および動的ヤング係数に危険率1%水準で、比動的ヤング係数と節枝数に危険率5%水準で産地間に有意差が認められた。各形質の平均値と標準偏差の範囲を産地別に図3-2-7に示した。容積密度数は、北海道の東部地域の弟子屈、本別、陸別および阿寒が高く、北

表 3-2-4 各形質の分散分析による産地間の有意性

| 形 質      | 自 由 度 |     | 平 均 平 方  |         | 分散比      |
|----------|-------|-----|----------|---------|----------|
|          | 産地間   | 産地内 | 産地間      | 産地内     |          |
| 容積密度数    | 5     | 32  | 1424.082 | 353.619 | 4.027 ** |
| 年輪幅      | 5     | 32  | 1.078    | 0.241   | 4.471 ** |
| 動的ヤング係数  | 5     | 32  | 364.732  | 72.588  | 5.025 ** |
| 比動的ヤング係数 | 5     | 32  | 0.157    | 0.051   | 3.087 *  |
| 節枝数      | 5     | 32  | 11.678   | 4.148   | 2.816 *  |

\*\*: 危険率1%水準で有意, \*: 危険率5%水準で有意。

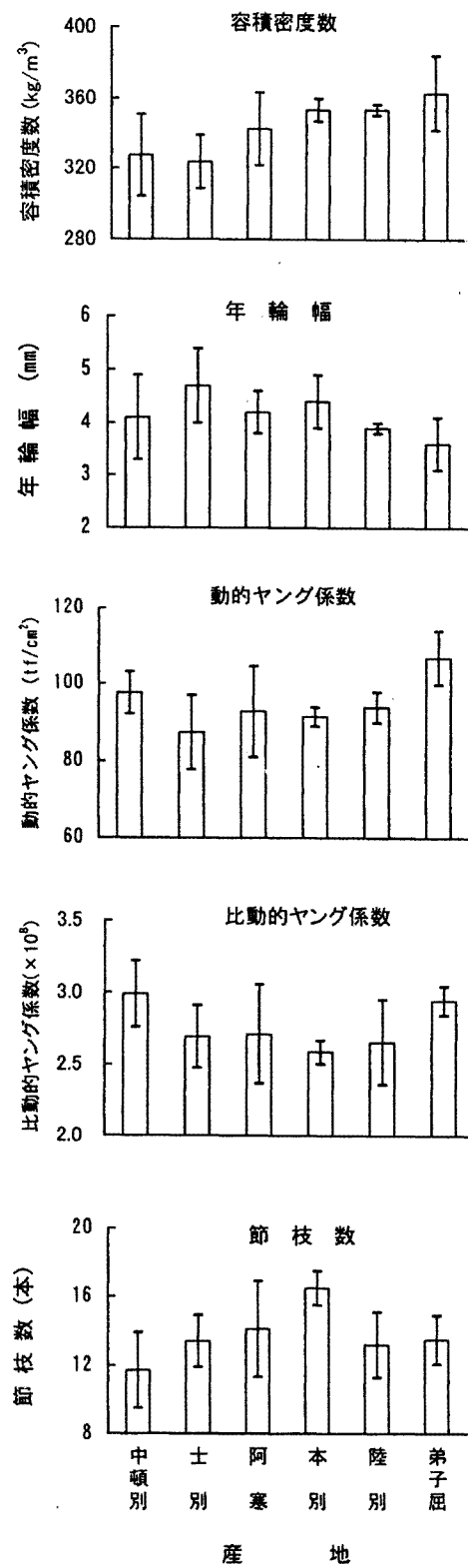


図3-2-7 材質形質の産地間比較

垂直線の範囲：標準偏差

部地域の中傾別と士別が低い値を示し、 $t$ 検定の結果、東部と北部地域には有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められた。年輪幅は士別が最も広く、弟子屈が最も狭い値を示した。動的ヤング係数は弟子屈、つぎに中傾別が高く、士別が最も低い値を示した。比動的ヤング係数は中傾別および弟子屈が高く、本別が最も低い値を示した。節枝数は本別が最も多く、中傾別が最も少ない結果を示した。本別では、輪生枝のほかに節間中にも節枝が出現する傾向がみられたが、中傾別では、輪生枝以外の節間中に節枝の出現が少ないという特徴が認められた。

産地別の傾向をみると、中傾別および士別が低い容積密度数を示した。しかし、中傾別で動的ヤング係数および比動的ヤング係数が高かった要因のひとつは、節枝数が少なかったことによる可能性が推察される。士別では、動的ヤング係数が中傾別よりも低い値を示した要因のひとつとして、節枝数が中傾別よりも多いことによると推察される。弟子屈では、容積密度数と動的ヤング係数が最も高い値を示した。節枝数の最も多かった本別では、比動的ヤング係数が最も低い値を示した。阿寒および陸別については、動的ヤング係数と節枝数は平均値に近い値を示した。

以上の結果から、容積密度数、年輪幅、動的ヤング係数および節枝数にクローン間に有意差が認められ、産地間変異の存在が示唆された。従って、それらの形質の組合せによるクローン特性や産地の特徴を考慮した材質評価が必要であると考えられる。容積密度数については、東部と北部地域に差異が存在する可能性が推察される。比動的ヤング係数については、節枝数の最も少ない中傾別が最も高く、節枝数の最も多い本別が最も低い結果を示した。浦上・牧野 (1995) は、比動的ヤング係数と節率の間に極めて高い負の相関があると報告しているが、本調査においても、有節材の生材丸太の比動的ヤング係数は、節枝数の影響を受けている可能性が推察される。トドマツの節枝数では、積雪との関連から産地間変異が報告 (畠山, 1987) されているので、アカエゾマツの節枝数についても、積雪との関連性を調査する必要がある。またアカエゾマツでは、クローン間の違いと産地間の違いのどちらが材質や形質に及ぼす影響が強いかを明らかにするため、クローン間や産地間変異に関する情報の蓄積を図る必要がある。なお本研究の結果に基づいて、容積密度数および動的ヤング係数で高い値を示し、かつ成長を考慮して精英樹5クローン (留辺蘂 110, 弟子屈 106, 弟子屈 110, 阿寒 101, 大雪 108) を、採種母樹および交配素材として推奨品種に指定した (林野庁林木育種センター, 2000)。

## 2.4 要 旨

アカエゾマツ精英樹クローンを供試して、容積密度数、年輪幅、動的ヤング係数および節枝形質に関して調査した。その結果は、以下のとおりである。

- (1) 胸高部位における髄からの年輪数が25以下のアカエゾマツ精英樹クローンでは、容積密度数、年輪幅、動的ヤング係数および各節枝形質でクローン間に有意差が認められた。容積密度数の辺縁部において、分散比が最も高い値を示した。

アカエゾマツの容積密度数、年輪幅、動的ヤング係数および各節枝形質でクローン間変異が存在することから、育種的な改良の可能性のある形質であることが示唆された。髄から16年輪以降の辺縁部の容積密度数については、分散比が高いことから、遺伝的要因の寄与が高いと考えられる。

- (2) 形質の相互関係については、容積密度数と年輪幅では、辺縁部と樹心部との間に有意な正の相関を示し、容積密度数と年輪幅との間に有意な負の相関を示した。また生材丸太の動的ヤング係数は、容積密度数との間に有意な正の相関 ( $p < 0.01$ ) を示し、丸太径および節枝数との間に有意な負の相関 ( $p < 0.05$ ) を示した。

直径成長の良好なアカエゾマツ精英樹クローンは、容積密度数と動的ヤング係数が低くなる傾向を示した。また枝打ちを行うことで、動的ヤング係数の値を向上させる可能性が示唆された。

- (3) 産地別にみると、容積密度数は東部地域が北部地域より高い値を示し、有意差が認められた。また比動的ヤング係数は、動的ヤング係数の高い弟子屈と節枝数の少ない中頓別が高く、節枝数の多い本別が低い傾向を示した。アカエゾマツは産地あるいは地域により、容積密度数、動的ヤング係数および節枝数に特徴があることが示唆された。従って産地毎の自然環境、立地条件とそれぞれの形質の関係を明らかにする必要があると考えられる。

### 第3節 精英樹クローンの成長および材質の遺伝変異

#### 3.1 はじめに

精英樹クローンで構成された採種園から採取した育種種子の普及を進めるためには、採種木となるクローンの特性を明らかにすることと、その情報に基づいて、採種園の改良を図ることが重要な課題である。

優良な種苗を採種するための採種園の改良に当たり、不良クローンを除去するために選木基準が必要になるが、このために精英樹クローンの特性評価は不可欠である。また、着花結実に長期間を要する採種園の管理のためには、成長や材質のクローン間差や反復率の年次変化を明らかにする必要がある。北海道におけるアカエゾマツの採種園は、樹型誘導を行わない自然型仕立てであるため、単木混交で植栽されたクローン検定林と同様な情報が得られると考えられる。また採種園は、植栽間隔が広いと、個体間競争の影響は無視できると考えられる。個体間競争は、無性繁殖したときの選抜効果の目安となる、広義の遺伝率(反復率)に影響を与えるといわれている(Sakai・Mukaide, 1966; Sakai *et al.*, 1966)。有田(1957, 1962)は、スギの枝張りに関する遺伝的性質の研究に当たり、隣接木との間の影響を避けるため、孤立木の状態に近い林分を調査対象とした。これらの理由から、採種園に植栽された精英樹クローンを供試して、成長や材質のクローン間変異や反復率を推定できると考えられる。

本節では、採種木および不良クローン除去等の選木に利用するための精英樹クローンの特性および採種園の管理や改良のための基礎的な情報を得る目的で、成長調査で6ヵ所、材質調査で2ヵ所の採種園について、成長形質と容積密度数に関するクローン間変異、反復率および採種園間の相互関係を検討した。さらに、育種場の育種素材保存園(以下、「保存園」とする。)と遠隔地にある採種園との共通クローンの相互関係を調べ、保存園における成長と材質を検定する意義と可能性を検討した。

#### 3.2 材料と方法

##### 3.2.1 精英樹クローンの成長調査

クローンの成長調査の1ヵ所として、林木育種センター北海道育種場(以下、「育種場採種園」とする。)の平坦地に設定されたアカエゾマツ採種園の精英樹クローンを供試した。育種場採種園は、1966年9月に精英樹49クローンの542本で設定され、各クローンの個体は単木混交で植栽された。面積は0.94ha、立木密度は580本/haで設定されたが、1980年に採種園の一部廃止により、面積は0.65haとなった。設定後24年目の1989年11月に伐採率45%に相当する170本を整理伐し、29年目の1994年10月に地上高2m程度まで裾枝払いを実施した。1995年の30年生の調査時点における立木間隔は6m、全本数は205本で立木密度が315本/haであった。定期成長調査は植栽木の全個体を対象に、設定年を林齢1年とし、5年生は樹高、10年生目以降からは胸高直径およびクローネ径も併せて、5年毎に測定した。30年生では裾枝払い実施後であったため、クローネ径の調査は除外された。分析対象と

した精英樹クローンは、30年生調査に1クローン当たり2個体以上が存在し、かつ成長過程で主軸の折損等が観察されていない48クローン198本であった。樹高とクローネ径は10cm単位で測定し、胸高直径は10年生で0.1cm単位、15年と20年生で0.5cm単位、それ以降は1cm単位で測定した。樹高の調査には測竿を用い、クローネ径は、長径とそれに直交する径の2方向の平均として表した。

また、北海道内の6ヵ所の採種園（清川、明治、奥春別、由仁、高丘および育種場の採種園：表3-3-2参照）の精英樹クローンの樹高と胸高直径を測定した。採種園の各クローンの個体は、単木混交で植栽されている。調査は25年生のクローンの個体を対象とし、育種場採種園以外の採種園では、整理伐が実施されていない箇所で行った。分析対象は1クローン当たり2個体以上存在し、かつ成長過程で主軸の折損が観察されていない全ての個体とした。1採種園当たり、平均で37クローンの446個体であった。樹高は個体毎に測竿を用いて10cm単位で、胸高直径は1cm単位で測定した。なお、育種場採種園以外の採種園では、調査は1993年から1995年に実施し、調査時期に25年生以外のクローンを調査対象から除外した。

さらに、精英樹クローンが列条に植栽されている育種場の保存園と、遠隔地に植栽されている共通クローンとの相互関係を調べるため、保存園に植栽されているクローンの25年生の樹高と胸高直径を対象に、1クローンにつき5個体を基本として、前述した調査方法と同様に測定した。

### 3.2.2 精英樹クローンの材質調査

材質調査には、旭川営林支局上川営林署清川採種園および育種場採種園に植栽されている採種木である、精英樹クローンを供試した。清川採種園は1992年2月に25年生（一部24年生）の採種木が整理伐され、その中から39クローンについて、地上高4m部位から厚さ5cmの円板を採取した。個体数は1クローンにつき2～3個体の108個体であった。一方、育種場採種園では、1989年11月に24年生の整理伐木の中から、胸高部位で厚さ5cmの円板を採取した。供試したクローンは清川採種園と共通した23クローンとし、個体数は1クローンにつき1～3個体の38個体であった。

清川採種園の供試クローンは、円板の直径を測定後、最近5年間に直径成長した辺縁部（髄から平均で13～17年輪の部位）および樹心部（髄から平均で5～9年輪の部位）の2ヵ所の部位から、無欠点小試験体を作製し、容積密度数と年輪幅を測定した。容積密度数は、前述した方法（第3章第2節2.2容積密度数の測定）と同様に測定した。育種場採種園の供試クローンは、最近5年間に直径成長した辺縁部について、前述した方法で容積密度数と年輪幅を測定した。さらに、前述した第3章第2節で解析した、育種場の保存園と清川採種園のクローンとの共通クローンについて、容積密度数および年輪幅における相互関係を調べた。

### 3.2.3 統計的な解析方法

成長と材質形質に関して、クローンを要因とした分散分析によるクローン間差および反復率を推定した。採種園における成長形質および容積密度数と年輪幅の反復率は、単木混交植栽データの一元分類の分散分析（明石，1989a）により、全分散（クローン分散＋環境分散）に対するクローン分散の比から算出した。また、複数の採種園に共通したクローンの諸形質について、採種園間、クローン間差、採種園とクローンの交互作用および反復率を検討するため、単木混交植栽によるモデルの分散分析（明石，1989b）により、クローン間差、交互作用および反復率を算出した。反復率は、全分散（クローン分散＋交互作用分散＋採種園ごとのクローン内個体分散）に対するクローン分

散の比として推定した。

### 3.3 結果と考察

#### 3.3.1 精英樹クローンの成長特性

##### 3.3.1.1 クローン間差および反復率の年次変化

育種場採種園の成長過程を表3-3-1に示した。採種園は、採種木の樹冠全体に陽光を受けるように管理されており、造林地よりも植栽間隔は広い。クローンを要因とした分散分析の結果、調査した全ての林齢のそれぞれの成長形質でクローン間に有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められた。胸高部の直径成長は、10年生から20年生間で0.8cm/年、20年生から25年生間では1.1cm/年、さらに25年生から30年生間では0.9cm/年であった。24年生で初回間伐が実施されているが、立木密度調整による直径成長速度の顕著な増加は見られず、30年生までは比較的安定した直径成長を示していた。

成長形質の反復率の年次変化を図3-3-1に示した。反復率は遺伝的寄与の大きさの目安になる。各形質の反復率は、林齢25年生までは0.5以上で比較的安定した高い値で推移を示した。30年生の樹高は、反復率が0.39に低下したが、胸高直径は最も高い反復率の0.71を示した。またクローネ径は、25年生で0.65と高い値を示した。反復率の最大の時期は、樹冠の閉鎖と密接な関係があると言われている (Nienstaedt・Rimenschneider, 1985)。樹高の反復率は20年生以降で減少する傾向を示したが、胸高直径の反復率は30年生で最も高い値を示した。このため、樹冠の閉鎖が及ぼす反復率の最大の時期は、樹高と胸高直径では異なると推察される。アカエゾマツの25年生の反復率は、樹高が0.51、胸高直径が0.67、クローネ径が0.65と比較的高い値を示した。アカエゾマツは、針広混交林を構成することが少なく、蛇紋岩等の特殊な土壌環境下に純林を形成する特徴があり、生態的に特異な樹種 (館脇, 1943) といわれていることから、これらの形質の遺伝的変異は大きいことが推察される。

表 3-3-1 育種場採種園の30年間の成長過程

| 形 質 |      | 林 齢 (年) |      |      |      |      |      |
|-----|------|---------|------|------|------|------|------|
|     |      | 5       | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |
| H   | Avg. | 1.5     | 2.7  | 4.2  | 6.4  | 7.7  | 10.4 |
|     | Std. | 0.3     | 0.5  | 0.7  | 0.8  | 0.8  | 0.8  |
| DBH | Avg. | －       | 4.6  | 8.5  | 12.6 | 18.3 | 22.9 |
|     | Std. | －       | 1.1  | 1.6  | 2.4  | 3.3  | 3.9  |
| CD  | Avg. | －       | 1.7  | 2.7  | 3.3  | 4.5  | －    |
|     | Std. | －       | 3.0  | 0.4  | 0.5  | 0.8  | －    |
| H/D | Avg. | －       | 59.4 | 50.1 | 51.2 | 42.7 | 46.4 |
|     | Std. | －       | 6.5  | 5.5  | 5.9  | 5.5  | 6.1  |

H: 樹高(m), DBH: 胸高直径(cm), CD: クローネ径(m),  
H/D: 形状比。  
Avg.: 平均値, Std.: 標準偏差, -: 未測定。

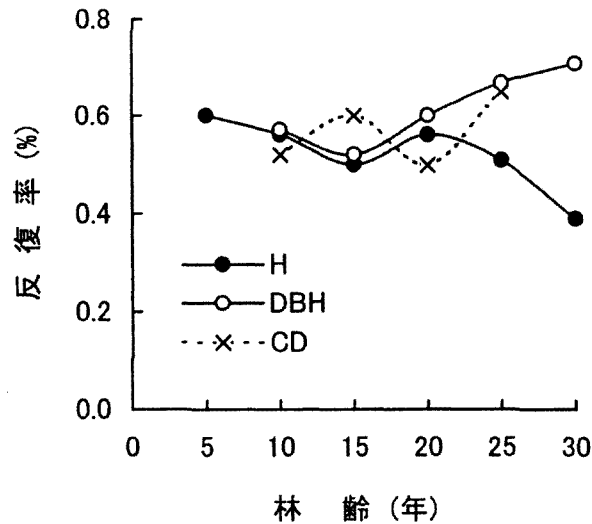


図 3-3-1 成長形質の反復率の年次変化

H: 樹高, DBH: 胸高直径, CD: クローネ径。

### 3.3.1.2 形質間の相互関係

樹高と胸高直径 (H-D), 胸高直径とクローネ径 (D-C) およびクローネ径と樹高 (C-H) の形質間の相関係数の年次変化を図 3-3-2 に示した。それぞれの組合せにおいて, 10 年生の相関係数が最も高く, 林齢の増加とともに相関係数は緩やかな減少傾向を示した。各組合せをみると, クローネ径と樹高の関係が最も安定して推移し, 25 年生の相関係数で 0.814 と高い値を示した。

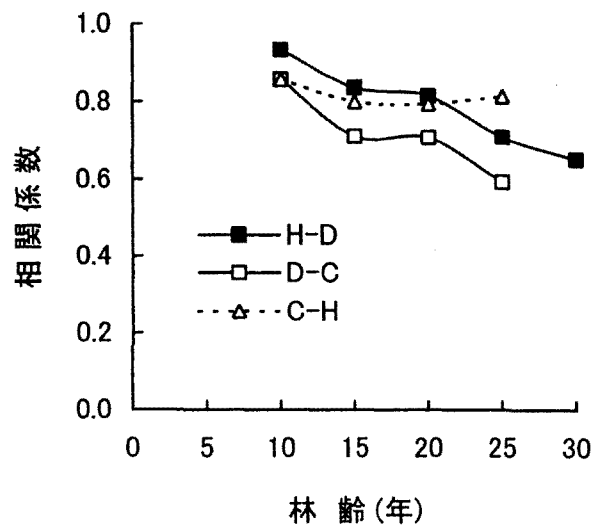


図 3-3-2 樹高, 胸高直径およびクローネ径における 2 形質間の相関係数の年次変化

H-D: 樹高と胸高直径の関係。

D-C: 胸高直径とクローネ径の関係。

C-H: クローネ径と樹高の関係

枝張りは、成長と樹形に重点を置いた精英樹選抜において重要な指標のひとつである。スギの場合、枝張りは遺伝的な形質と言われている（有田，1964）。ドイツトウヒにおいて、Lindstrochm（1996a）が回帰モデルを用いて幹細り、平均年輪幅および樹冠の広がりそれぞれ相互関係があること、また、それらの形質と容積密度数との間に有意な負の関係があることを報告している。そこで、アカエゾマツの形状比（樹高／胸高直径）とクローネ径（樹冠の広がり）について、10年生と25年生の関係を検討した（図3-3-3）。形状比の範囲は、10年生が25年生より広く、クローネ径では、25年生が10年生より広い。形状比とクローネ径との間の相関係数は、10年生で $-0.510$ 、25年生で $-0.658$ といずれも有意な負の相関（ $p < 0.01$ ）を示したため、両者の間に関連があると考えられる。スギの冠雪害については、形状比70以上で被害を受け易いことが報告されている（松田，1983）。アカエゾマツの林齢10年生には、形状比70以上を示したクローンが存在した。従って形状比の高いアカエゾマツでは、クローネ径が狭く、樹冠に付着する雪を少なくすることで、冠雪害を回避する樹形になっている可能性が推察される。このため、形状比およびクローネ径について、精英樹の選抜地と積雪の関係を調査する必要があると考えられる。

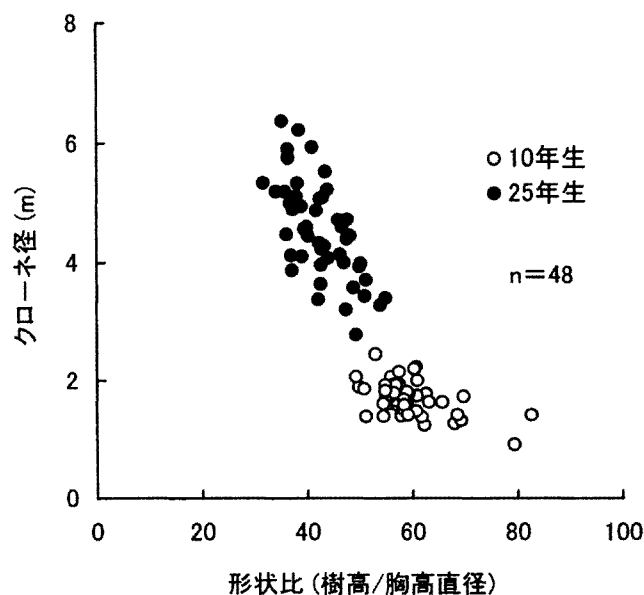


図3-3-3 林齢10年生および25年生の形状比とクローネ径の関係

n：クローン数。

### 3.3.1.3 採種園間の比較

北海道内に設定されている6ヵ所の採種園について、25年生時の胸高直径、樹高、反復率および調査対象としたクローン数と個体数を表3-3-2に示した。採種園によりクローン構成や生育環境が異なるが、平均胸高直径は19.5cm、平均樹高は9.8mであった。全ての採種園について、胸高直径および樹高にはクローン間に有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。胸高直径の反復率の平均は0.52で、その範囲は0.43～0.67であり、一方、樹高の反復率の平均は0.44で、その範囲は0.24～0.57であった。胸高直径の反復率が樹高より高い傾向を示したことから、胸高直径は樹高と比べて遺伝性が高く、再現性のある形質であると考えられる。

表 3-3-2 採種園別の 25 年生の胸高直径と樹高の測定結果および反復率

| (支)局 営林署 採種園 | 胸高直径(cm) |      | 樹 高(m) |      | 反 復 率 |      | 調 査 対 象 |     |
|--------------|----------|------|--------|------|-------|------|---------|-----|
|              | Avg.     | Std. | Avg.   | Std. | 胸高直径  | 樹 高  | クローン数   | 個体数 |
| 旭 川 上 川 清 川  | 21.0     | 3.2  | 10.9   | 1.1  | 0.45  | 0.46 | 30      | 633 |
| 北 見 網 走 明 治  | 19.0     | 3.6  | 10.6   | 1.0  | 0.46  | 0.24 | 42      | 360 |
| 帯 広 弟子屈 奥春別  | 21.6     | 2.6  | 10.9   | 1.0  | 0.45  | 0.57 | 44      | 546 |
| 北海道 岩見沢 由 仁  | 20.4     | 3.6  | 9.9    | 1.2  | 0.43  | 0.34 | 27      | 306 |
| 苫小牧 高 丘      | 16.7     | 2.7  | 8.5    | 1.2  | 0.64  | 0.52 | 30      | 635 |
| 育種場 場 内      | 18.3     | 3.3  | 7.7    | 0.8  | 0.67  | 0.51 | 48      | 198 |
| 平 均          | 19.5     | 3.2  | 9.8    | 1.1  | 0.52  | 0.44 | 37      | 446 |

Avg.: 平均値, Std.: 標準偏差。

採種園間の相互関係を検討するため、3ヵ所の採種園を1組合せとして、胸高直径と樹高の平均値について、胸高直径の大きなクローンの順に並べて表 3-3-3 に示した。全 3 組合せの共通採種園は清川採種園、共通クローンでは余市 104 であった。単木混交モデルによる分散分析の結果を表 3-3-4 に示した。清川・奥春別・由仁採種園における胸高直径以外の採種園の組合せについては、胸高直径、樹高ともに、クローン間および採種園間に有意差が認められた。採種園とクローンの交互作用は、胸高直径が 2 組合せで、樹高では 1 組合せで有意差が認められなかった。いろいろな環境条件のもとで、多種類の遺伝子型がそれぞれ異なった反応を示すことを、環境（採種園）と遺伝子型

表 3-3-3 3 ヵ所の採種園に共通したクローンの胸高直径と樹高の平均値

| クローン名  | 採 種 園 |      |      |      |      |     |      |      |
|--------|-------|------|------|------|------|-----|------|------|
|        | 清 川   |      | 奥春別  |      | 育種場  |     | 平 均  |      |
|        | DBH   | H    | DBH  | H    | DBH  | H   | DBH  | H    |
| 余 市104 | 28.4  | 11.8 | 27.4 | 12.2 | 26.4 | 8.4 | 27.4 | 10.8 |
| 中頓別102 | 25.5  | 13.4 | 23.1 | 12.6 | 20.7 | 8.3 | 23.1 | 11.4 |
| 置 戸109 | 21.7  | 10.9 | 22.2 | 11.4 | 18.4 | 7.0 | 20.8 | 9.8  |
| 弟子屈104 | 22.0  | 10.7 | 20.6 | 10.0 | 15.1 | 7.2 | 19.2 | 9.3  |
| 置 戸116 | 19.1  | 10.8 | 19.6 | 11.3 | 18.5 | 8.6 | 19.1 | 10.2 |

| クローン名  | 清 川  |      | 奥春別  |      | 由 仁  |      | 平 均  |      |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        | DBH  | H    | DBH  | H    | DBH  | H    | DBH  | H    |
|        | DBH  | H    | DBH  | H    | DBH  | H    | DBH  | H    |
| 余 市104 | 28.4 | 11.8 | 27.4 | 12.2 | 27.2 | 12.2 | 27.7 | 12.1 |
| 足 寄137 | 23.5 | 10.8 | 23.2 | 10.6 | 20.6 | 9.4  | 22.4 | 10.3 |
| 置 戸109 | 21.7 | 10.9 | 22.2 | 11.4 | 18.4 | 7.0  | 20.8 | 9.8  |
| 士 別110 | 21.2 | 11.6 | 20.2 | 10.8 | 19.8 | 10.8 | 20.4 | 11.1 |
| 阿 寒139 | 17.9 | 9.4  | 20.4 | 10.4 | 19.5 | 8.9  | 19.3 | 9.6  |
| 阿 寒144 | 17.5 | 9.5  | 19.1 | 9.4  | 19.6 | 9.4  | 18.7 | 9.4  |

| クローン名  | 清 川  |      | 由 仁  |      | 高 丘  |     | 平 均  |      |
|--------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
|        | DBH  | H    | DBH  | H    | DBH  | H   | DBH  | H    |
|        | DBH  | H    | DBH  | H    | DBH  | H   | DBH  | H    |
| 余 市104 | 28.4 | 11.8 | 27.2 | 12.2 | 26.4 | 8.4 | 27.3 | 10.8 |
| 東 大270 | 21.0 | 10.3 | 24.3 | 10.8 | 20.0 | 9.4 | 21.8 | 10.2 |
| 士 別102 | 20.8 | 10.7 | 20.1 | 9.2  | 18.4 | 8.7 | 19.8 | 9.5  |
| 士 別110 | 21.2 | 11.6 | 19.8 | 10.8 | 16.0 | 8.5 | 19.0 | 10.3 |
| 大夕張101 | 16.0 | 9.2  | 15.3 | 8.0  | 13.7 | 7.0 | 15.0 | 8.1  |
| 金 山103 | 18.1 | 9.6  | 12.5 | 8.2  | 13.4 | 7.4 | 14.7 | 8.4  |

DBH: 胸高直径(cm), H: 樹高(m)。

表 3-3-4 3カ所の採種園に関する胸高直径と樹高の分散分析結果

清川・奥春別・育種場採種園

| 要 因  | 自由度   | DBH        | H         |
|------|-------|------------|-----------|
|      |       | 分散比        | 分散比       |
| 採種園  | 2     | 9.1794 **  | 59.534 ** |
| クローン | 4     | 19.3085 ** | 5.8036 *  |
| 交互作用 | 8     | 1.8688 n.s | 2.5446 *  |
| 誤 差  | (208) |            |           |

清川・奥春別・由仁採種園

| 要 因  | 自由度   | DBH        | H          |
|------|-------|------------|------------|
|      |       | 分散比        | 分散比        |
| 採種園  | 2     | 0.2720 n.s | 6.9700 *   |
| クローン | 5     | 26.9383 ** | 15.6146 ** |
| 交互作用 | 10    | 1.7186 n.s | 1.8334 n.s |
| 誤 差  | (311) |            |            |

清川・由仁・高丘採種園

| 要 因  | 自由度   | DBH        | H          |
|------|-------|------------|------------|
|      |       | 分散比        | 分散比        |
| 採種園  | 2     | 6.3459 *   | 20.7213 ** |
| クローン | 5     | 25.7772 ** | 15.5819 ** |
| 交互作用 | 10    | 3.1448 **  | 3.5523 **  |
| 誤 差  | (288) |            |            |

DBH: 胸高直径, H: 樹高。

\*\* : 危険率1%水準で有意, \* : 5%水準で有意,  
n.s : 非有意。

(クローン)の交互作用という。この反応が安定した遺伝子型は、交互作用が小さいことを示す(大庭, 1972)。採種園の組合せ毎の反復率を表3-3-5に示した。胸高直径の平均反復率は0.49, 樹高の平均反復率は0.39であった。胸高直径は、採種園とクロンの組合せにより交互作用は認められたものの、樹高よりも交互作用は検出されにくく、平均反復率の高い傾向を示した。

次に、遠隔地に植栽された共通クロンの成長および胸高直径の相関を検討した。清川採種園と奥春別採種園に共通した17クローンについて、両採種園ともに平均胸高直径は21.2cmと同数値となり、樹高は清川採種園で10.8m, 奥春別採種園で10.9mとほぼ同じ値が得られた。両採種園の間の相関係数は、胸高直径で0.928, 樹高で0.795の有意な正の相関 ( $p < 0.01$ ) を示した(図3-3-4)。さらに、保存園と奥春別採種園に共通した21クロンの胸高直径および樹高の関係を図3-3-5に示した。保存園の胸高直径および樹高の平均は、14.9cmおよび7.9m, 奥春別採種園のそれらの平均は、21.3cmおよび14.6mであった。 $t$ 検定の結果、保存園と奥春別採種園には、胸高直径および樹

表 3-3-5 単木混交モデルによる胸高直径と樹高の反復率

| 採種園の組合せ    | 胸高直径 | 樹 高  |
|------------|------|------|
| 清川・奥春別・育種場 | 0.59 | 0.29 |
| 清川・奥春別・由仁  | 0.45 | 0.31 |
| 清川・由仁・高丘   | 0.42 | 0.57 |
| 平 均        | 0.49 | 0.39 |

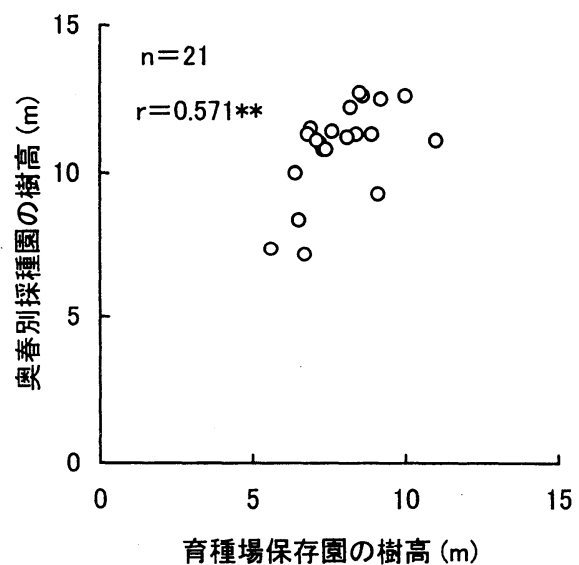
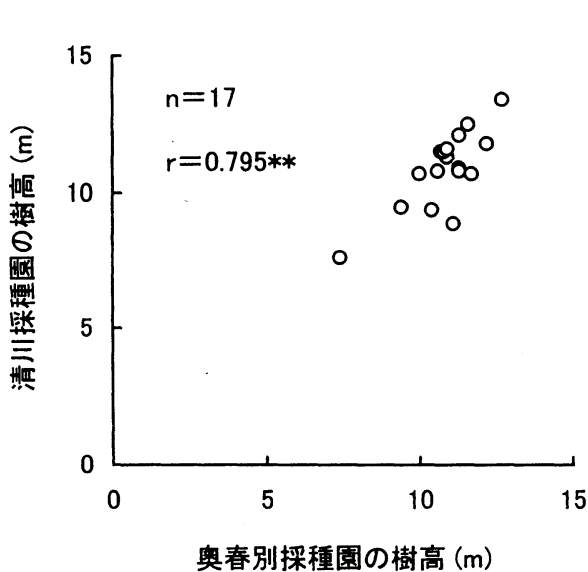
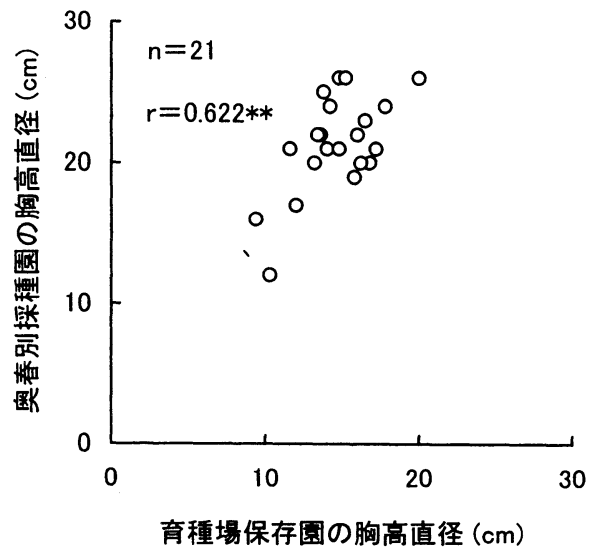
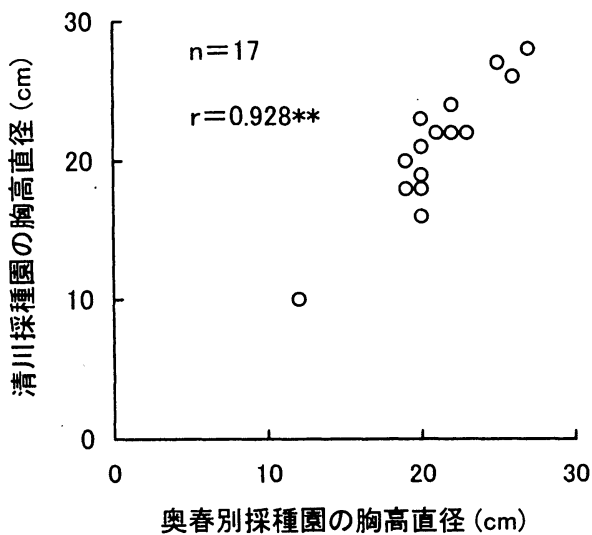


図 3-3-4 胸高直径および樹高に関する奥春別採種園と清川採種園の関係

n : クローン数, \*\* : 危険率 1 % 水準で有意。

図 3-3-5 胸高直径および樹高に関する育種場保存園と奥春別採種園の関係

n : クローン数, \*\* : 危険率 1 % 水準で有意。

高に有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められた。保存園と奥春別採種園との間の相関係数は、胸高直径で0.622、樹高で0.571の有意な正の相関 ( $p < 0.01$ ) を示した。

保存園は精英樹クローンが列条植栽され、採種園では単木混交植栽されているが、両者の間に有意な正の相関が示された。このことから、保存園における樹高と胸高直径の成長により、遠隔地に植栽されている共通クローンを相対的に評価できるものと推察される。

以上の結果から、遠隔地で生育環境の異なる採種園に植栽されたアカエゾマツ精英樹クローンについて、共通したクローン間の成長形質で正の相関が認められ、特に余市104は、いずれの採種園においても優れた直径成長を示した。胸高直径は、樹高と比べて反復率が高い傾向にあり、再現性が高いと考えられる。

### 3.3.2 精英樹クローンの材質特性

#### 3.3.2.1 クローン間差および形質間の相互関係

供試した清川採種園の円板は、平均直径で19 (±2) cm、平均年輪数で17 (±2) であった。アカエゾマツ人工林の未成熟材の範囲は、髄からの年輪で15～21年であり、これは天然木とほぼ同様であることが報告されている(川口ら, 1986a)。本研究の供試個体の辺縁部(髄から平均で13～17年輪の部位)は、未成熟材および未成熟材から成熟材に移行する部位に相当し、樹心部(髄から平均で5～9年輪の部位)は未成熟材で占められていると考えられる。

辺縁部と樹心部の測定部位について、容積密度数と年輪幅の測定結果、クローンを要因とした分散分析結果および反復率を表3-3-6に示した。全ての測定項目にクローン間差 ( $p < 0.01$ ) が認められた。年輪幅は辺縁部と樹心部で、ほぼ一定の値を示したが、容積密度数は辺縁部が低く、樹心部が高い値を示した。アカエゾマツの髄から樹皮に向けた25年輪程度における半径方向の容積密度数の変動は、髄周辺が高く、それ以降は減少し安定する傾向がある(安久津・飯塚, 1997; 飯塚ら, 1997, 1998)ため、本研究の測定部位は、辺縁部で容積密度数の安定した箇所、樹心部では容積密度数の高い箇所であると考えられる。容積密度数の反復率は、樹心部よりも辺縁部が高く、辺縁部で0.80、樹心部で0.71を示した。一方、年輪幅の反復率は、辺縁部よりも樹心部が高く、辺縁部で0.47、樹心部で0.56を示した。

これまで、ドイツトウヒの反復率について、Kennedy (1966) は、1年輪の平均密度の反復率で0.84と高い値を報告している。またWorrall (1975) は、1966年と1967年の2年間の1年輪毎の密度および年輪幅の測定値から、密

表 3-3-6 容積密度数と年輪幅の測定結果、分散分析結果および反復率

| 項 目                       | 測 定 結 果 |      |      | 分 散 分 析 結 果 |       |          |         | 分散比      | 反復率  |
|---------------------------|---------|------|------|-------------|-------|----------|---------|----------|------|
|                           | Avg.    | Max. | Min. | 自 由 度       |       | 平 均 平 方  |         |          |      |
|                           |         |      |      | クローン間       | クローン内 | クローン間    | クローン内   |          |      |
| 辺縁部                       |         |      |      |             |       |          |         |          |      |
| 容積密度数(kg/m <sup>3</sup> ) | 319     | 376  | 278  | 38          | 69    | 1390.726 | 119.920 | 11.597** | 0.80 |
| 年 輪 幅(mm)                 | 5.7     | 7.3  | 4.1  | 38          | 69    | 1.218    | 0.363   | 3.355**  | 0.47 |
| 樹心部                       |         |      |      |             |       |          |         |          |      |
| 容積密度数(kg/m <sup>3</sup> ) | 338     | 400  | 299  | 38          | 69    | 1614.596 | 214.696 | 7.520**  | 0.71 |
| 年 輪 幅(mm)                 | 5.8     | 7.6  | 4.4  | 38          | 69    | 1.232    | 0.277   | 4.448**  | 0.56 |

Avg.: 平均値, Max.: 最大値, Min.: 最小値。

\*\* : 危険率1%水準で有意。

度の反復率がそれぞれ0.51と0.70, および年輪幅がそれぞれ0.37と0.62であると報告している。本研究において得られたアカエゾマツの反復率は、既報告のドイツトウヒと同様な傾向を示していた。アカエゾマツの容積密度数は、年輪幅と比べて反復率が高い値を示し、遺伝的要因の寄与が高く、再現性のある形質であることが示唆される。

次に、形質間の相互関係について検討した。年輪幅と容積密度数との間の相関係数は、辺縁部で-0.595, 樹心部で-0.430と有意な負の相関 ( $p < 0.01$ ) を示した。また、辺縁部と樹心部との間の相関係数は、容積密度数で0.889, 年輪幅で0.707と有意な正の相関 ( $p < 0.01$ ) を示した。容積密度数および年輪幅の関係については、樹心部と辺縁部との間に有意な正の相関を示した。このことから、採種園に植栽されたアカエゾマツ精英樹クローンにおいて、年輪数が20以下の場合、直径成長の早いクローンでは容積密度数が低くなる傾向があり、年輪幅と容積密度数は比較的關係があることが示唆される。

### 3.3.2.2 採種園間の比較

清川採種園と育種場採種園の遠隔地における共通した23クローンについて、形質間の相互関係を比較した。これまでのアカエゾマツ精英樹クローンの材質に関する特性調査の中で、容積密度数については、胸高部位と4.2m部位との間に正の相関が見い出されている(飯塚ら, 1998)ため、育種場採種園の供試クローンの胸高部位と、清川採種園の供試クローンの4m部位の容積密度数を比較検討する意味があると考えられる。育種場採種園の供試円板におけるそれぞれの形質の平均値は、直径が14.5cm, 容積密度数が363kg/m<sup>3</sup>, 年輪幅が4.3mmおよび年輪数が17であった。測定した辺縁部(髄から平均で13~17年輪の部位)は、未成熟材から成熟材への移行部位と推察される(川口ら, 1986a)。なお、清川採種園と育種場採種園との共通したクローンは、平均容積密度数が316kg/m<sup>3</sup>, 平均年輪幅が5.7mmであった。清川採種園と育種場採種園との間の相関係数は、容積密度数で0.754 ( $p < 0.01$ ), 年輪幅で0.510 ( $p < 0.05$ )で、それぞれ有意な正の相関を示した(図3-3-6)。さらに、保存園と清川採種園に共通した21クローンの辺縁部における容積密度数および年輪幅の関係を、図3-3-7に示した。保存園の容積密度数および年輪幅の平均は、349kg/m<sup>3</sup>および3.9mm, 清川採種園のそれらの平均は、318kg/m<sup>3</sup>および5.7mmであった。保存園と清川採種園との間の相関係数は、容積密度数で0.804, 年輪幅で0.579を示し、それぞれ有意な正の相関 ( $p < 0.01$ ) を示した。容積密度数は、年輪幅と比べて遺伝性が高く、再現性のある形質であると考えられ、両形質ともに保存園における測定値を用いて、遠隔地に植栽された共通クローンの相対的な評価ができるものと示唆される。

育種場採種園から供試した精英樹クローンについて、1クローン当たり2個体以上の11クローンを対象に、クローンを要因とした分散分析の結果、容積密度数および年輪幅にクローン間に有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められ、反復率は容積密度数で0.91, 年輪幅で0.77と高い値を示した。清川採種園と育種場採種園に共通した11クローンについて、単木混交モデルによる分散分析の結果を表3-3-7に示した。容積密度数の平均値は清川採種園が316kg/m<sup>3</sup>, 育種場採種園が363kg/m<sup>3</sup>であり、年輪幅では清川採種園が5.7mm, 育種場採種園が4.3mmであった。各形質には採種園間、クローン間および採種園とクローンの間の交互作用に有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められた。容積密度数および年輪幅の反復率は、それぞれ0.70および0.68と高い値を示した。

以上の結果から、遠隔地における共通クローンの容積密度数および年輪幅は、クローン間で有意な正の相関を示し、両形質ともに高い反復率を示した。特に容積密度数は、遺伝性が高く、再現性のある形質であると推察できることから、1ヵ所の採種園の評価に基づいて、遠隔地にある採種園の精英樹クローンを相対的に評価できる可能性が示唆された。

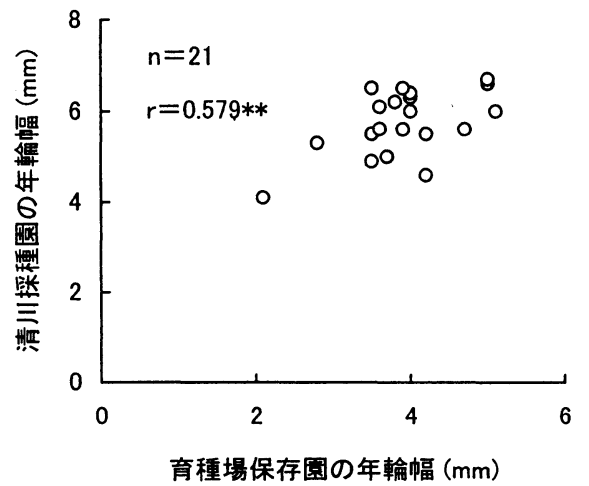
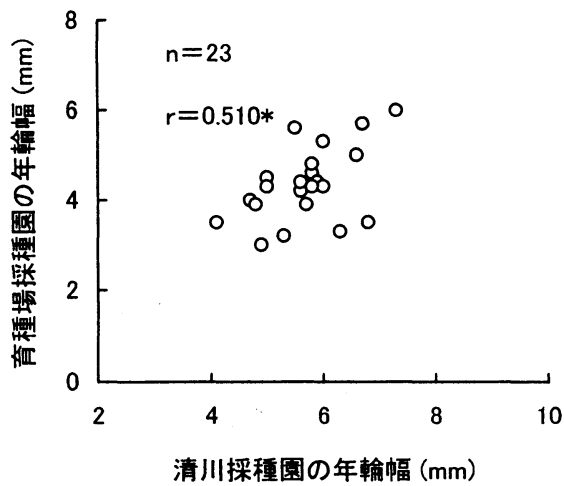
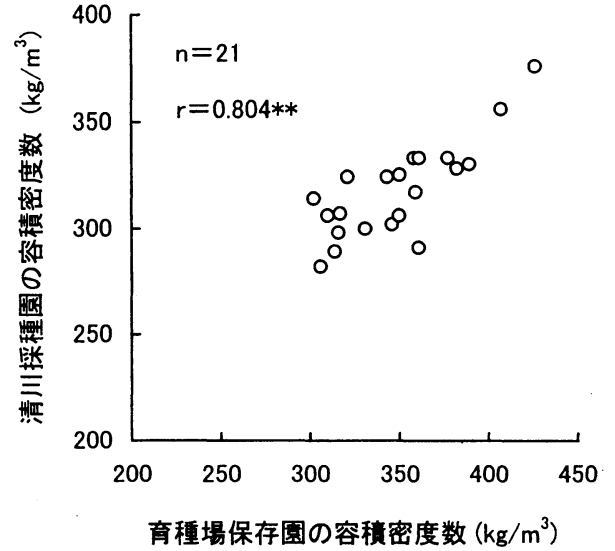
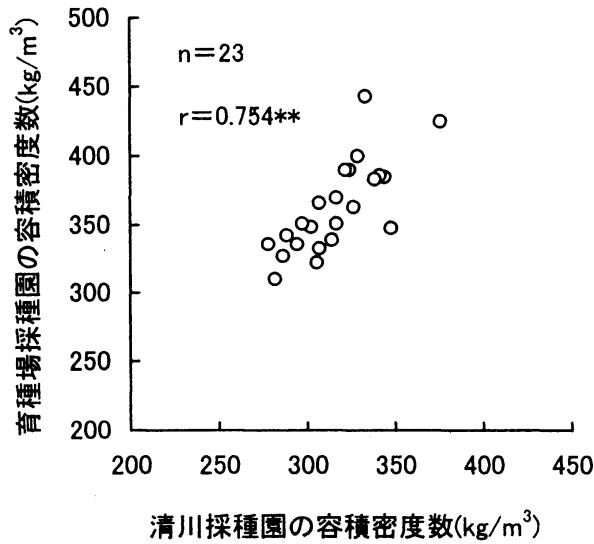


図 3-3-6 容積密度数および年輪幅に関する清川採種園と育種場採種園の関係

n : クローン数, \*\*: 危険率 1% 水準で有意,  
\* : 危険率 5% 水準で有意。

図 3-3-7 容積密度数および年輪幅に関する育種場保存園と清川採種園の関係

n : クローン数, \*\*: 危険率 1% 水準で有意。

表 3-3-7 2 ヶ所の採種園の容積密度数と年輪幅測定結果  
および分散分析結果

| 項 目    | 容積密度数                | 年輪幅      |          |
|--------|----------------------|----------|----------|
| 測定結果   | (kg/m <sup>3</sup> ) | (mm)     |          |
| 清 川採種園 | 316                  | 5.7      |          |
| 育種場採種園 | 363                  | 4.3      |          |
| 分散分析結果 |                      |          |          |
| 要 因    | 自由度                  | 分散比      | 分散比      |
| 採種園    | 1                    | 43.403** | 34.596** |
| クローン   | 10                   | 6.976**  | 6.353**  |
| 交互作用   | 10                   | 5.216**  | 5.314**  |
| 誤差     | (34)                 |          |          |

測定結果は平均値を示す。

\*\*:危険率1%水準で有意。

材質育種を推進するには、基礎的な材質や諸形質に関する情報の蓄積が求められ、また、優良種苗の供給および普及のためには、採種園の改良に当たり、材質を考慮した不良クローンの除去および優良な採種木の選定が必要である。アカエゾマツ精英樹クローンは、成長形質と容積密度数に関する遺伝的変異が大きいことが示唆されたが、産地間変異および造林樹種としての適応性に関する基礎的情報の蓄積が重要である。また精英樹家系について、樹高、胸高直径および生存率の家系間差に関する報告（飯塚ら、1999b）は見られるが、材質に関する情報はない。今後、精英樹家系の材質特性、諸形質における母樹と子供家系の関係および狭義の遺伝率を把握することが必要である。

### 3.4 要 旨

採種園に植栽されている精英樹クローンを供試して、樹高、胸高直径、クローネ径および容積密度数に関して調査した。その結果は、以下のとおりである。

- (1) 30年生までの樹高、胸高直径およびクローンの年次相関および形質間の相関係数は、比較的高い値を示した。6 ヶ所の採種園における25年生の平均反復率は、胸高直径で0.52、樹高で0.44を示し、胸高直径は、樹高より再現性が高いことが示唆される。
- (2) 容積密度数の反復率は辺縁部で0.80、樹心部で0.71を示し、年輪幅は辺縁部で0.47、樹心部で0.56を示した。また、2 ヶ所の採種園に共通したクローンの辺縁部の反復率は容積密度数で0.70、年輪幅で0.68といずれも高い値を示した。特に、容積密度数の反復率は高い値を示し、年輪幅より再現性が高いことが示唆される。
- (3) 遠隔地に植栽された共通クローンの樹高、胸高直径および容積密度数の関係については、採種園間で共通クローンの間に有意な正の相関が認められた。さらに、保存園と採種間にも有意な正の相関が示された。

このことから、アカエゾマツ精英樹クローンについては、育種場の保存園における樹高、胸高直径および容積密度数の調査結果が、遠隔地にある共通クローンの相対的な評価に有効であることが示唆される。

## 第4節 産地別の実生の成長および容積密度数

### 4.1 はじめに

アカエゾマツの諸形質の産地間変異に関しては、苗高と雪ぐされの罹病率(丸岡ら, 1972), 苗高と子葉数(丸岡・栄花, 1975; 丸岡ら, 1973), 苗高と開葉時期(岡田, 1975), 樹齢15年と20年の樹高(栄花ら, 1988), 材質形質(飯塚ら, 1994b), 土壤母材を異にした産地試験(工藤ら, 1998; 門松ら, 1999)などの報告がある。これらの結果から、アカエゾマツの諸形質について、産地間変異のあることが示された。現在、アカエゾマツの種苗配布区域は北海道全域であるが、林木育種の推進には、諸形質の産地間変異を明らかにして、地域に適応した種苗の配布区域を定める必要がある。

本節では、アカエゾマツの成長および材質を対象に、産地間、地理的変異および環境適応性を検討した。産地間変異を検討するに当たり、生育環境の異なる産地(地域)からの供試サンプルによる調査では、個体間および産地間の変異が環境によるものか、遺伝的なものか判断できない。表現形質の遺伝的な変異を明らかにするためには、環境効果を分離できる試験地における調査が必要である(生方ら, 1999)。そこで、樹高、胸高直径および生存率で3ヵ所、容積密度数で1ヵ所について、産地別に植栽された試験地で調査を行い、それぞれの産地の標高、土壤母材および脊梁山脈で区分した東西地域における産地間差と地域変異を検討した。また試験地は、一般造林地と同様な植栽方法と保育を行っていることから、アカエゾマツ実生の人工造林木の成長に関する基礎的な情報を得ることができるため、成長特性に加えて生存率も調査した。

### 4.2 材料と方法

#### 4.2.1 成長調査

成長調査を行った3ヵ所および材質調査を行った1ヵ所の産地試験地(以下、「試験地」とする。)について、産地(採種林分)の標高および土壤母材を表3-4-1に、産地および試験地の位置を図3-4-1に示した。産地の標高は弟子屈の140mから富良野の1,140m、産地の土壤母材は、蛇紋岩、安山岩および石英粗面岩、また試験地の標高は遠軽の120mから足寄の430mである。それぞれの試験地における産地ごとの植栽木は、同一の採種林分の種子を起源としているが、母樹は必ずしも共通していない。林齢19年および21年における樹高、胸高直径および生存率を対象に、1999年5月および10月に調査を行った。それぞれの試験地では、これまで間伐は行われていない。

苫小牧試験地は、1産地につき平均20母樹(母樹数7~29個体)の種子を混合して育苗した苗木を、1プロットにつき50本植栽し、この2反復から成る乱塊法で設計された。樹高と胸高直径の調査は、苫小牧試験地では1プロット当たり任意の30個体で、合計1,200個体を調査した。足寄と白滝試験地では、1産地につき3~10母樹の家系を用い、母樹別にプロットを設定した。足寄試験地は、1プロットにつき40本植栽の3反復、白滝試験地は、1プロットにつき30本植栽の2反復の乱塊法で設計され、足寄試験地で3,000個体、白滝試験地で2,160個体の全個体を調査対象とした。生存率は、調査時点における植栽本数に対する生存率の比率とした。各試験地における樹高、胸高直径および生存率の産地間差については、苫小牧試験では、プロットの平均値をデータとした2元分類による分散分析(明石, 1988)で、足寄と白滝試験地では、枝分れ分類による分散分析に基づいて、それぞれプロットの平均値をデータからの産地間と産地内家系間の平均平方の比(奥野, 1978)で検討した。

表 3-4-1 産地(採種林分)の標高と土壌母材および試験地の概要

| 産 地        |            |         | 試 験 地        |             |             |             |
|------------|------------|---------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 産地名        | 標 高<br>(m) | 土 壌 母 材 | 成 長 調 査      |             |             | 材 質 調 査     |
|            |            |         | 苫小牧<br>(210) | 足寄<br>(430) | 白滝<br>(400) | 遠軽<br>(120) |
| 中頓別        | 330        | 蛇 紋 岩   | ○            | ○           | ○           |             |
| 中 川        | 230        | 蛇 紋 岩   | ○            | ○           | ○           |             |
| 士 別        | 380        | 蛇 紋 岩   |              |             |             | ○           |
| 大 雪        | 1100       | 安 山 岩   | ○            | ○           | ○           |             |
| 芦 別        | 650        | 蛇 紋 岩   | ○            | ○           | ○           | ○           |
| 美 瑛        | 800        | 安 山 岩   | ○            |             |             |             |
| 富良野        | 1140       | 安 山 岩   | ○            |             |             |             |
| 山 部        | 460        | 石英粗面岩   |              |             |             | ○           |
| 丸瀬布        | 910        | 石英粗面岩   | ○            |             |             | ○           |
| 清 里        | 280        | 安 山 岩   | ○            |             |             | ○           |
| 置 戸        | 760        | 安 山 岩   | ○            |             |             | ○           |
| 弟子屈        | 140        | 安 山 岩   | ○            | ○           | ○           |             |
| 足 寄        | 810        | 安 山 岩   | ○            |             |             | ○           |
| 本 別        | 650        | 安 山 岩   | ○            |             |             | ○           |
| 産地数        |            |         | 12           | 5           | 5           | 8           |
| 設定年度(年)    |            |         | 1978         | 1979        | 1981        | 1977        |
| 植栽本数(本/ha) |            |         | 2,500        | 2,000       | 3,000       | 3,000       |

各試験地の下段の( )内の数字は、試験地の標高(m)を示す。  
 遠軽試験地の足寄産地には、標高810mの他に、標高780mの林分からの種子を含む。  
 ○:試験地に設定されている産地を示す。

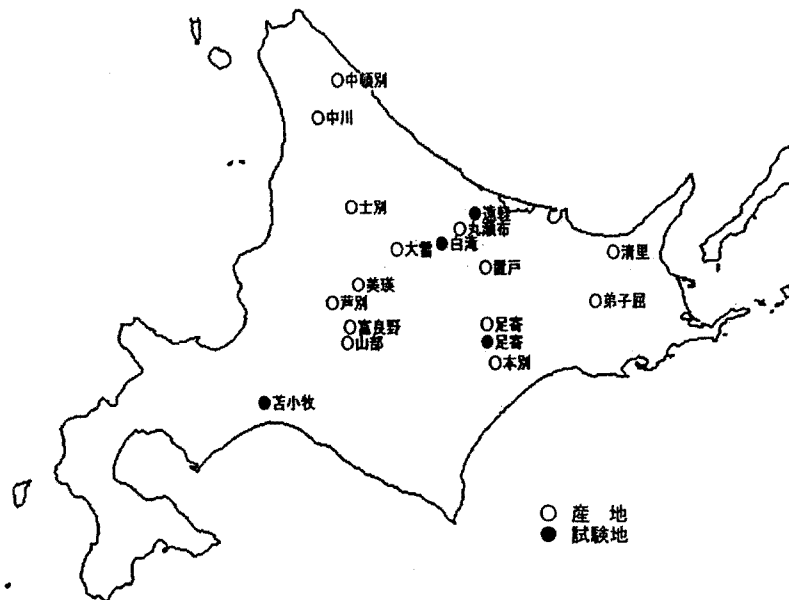


図 3-4-1 産地および試験地の位置図

#### 4.2.2 容積密度数の調査

材質調査を行った遠軽試験地は、10年間養苗された苗木が単木混交方式で植栽され、植栽後22年時に間伐率50%の列状間伐が行われた。試験地の設定は11産地であるが、間伐された個体数が少ない3産地を除く、1産地につき10～50母樹の家系を用いた8産地を分析対象とした。間伐前の生存率は89%であった。

主幹に折損が観察されず、かつ平均的な胸高直径を示した間伐木を供試材料とした。特定の家系に偏らないように考慮して、1産地につき8個体、合計で8産地、64個体の胸高部位から厚さ10cmの円板を採取した。その円板から、髄を頂点とした扇形試験片（中心角30度）を切り出し、髄から5年輪単位の試験体を作製し、容積密度数と年輪幅を測定した。容積密度数は、前述した方法（第3章第2節2.2容積密度数の測定）と同様に測定した。

#### 4.3 結果と考察

##### 4.3.1 成長の産地間比較

調査した3カ所の試験地の成長形質に関する結果を、表3-4-2に示した。測定項目の産地の平均値は樹高が7.1～7.5m、胸高直径が8.8～11.9cmおよび生存率が80～88%であった。産地を要因とした分散分析による有意差の判定を、表3-4-3に示した。苫小牧と足寄試験地では、樹高と胸高直径について産地間に有意差が認められ、白滝試験地では胸高直径に有意差が認められた。生存率は、いずれの試験地においても、産地間に有意差が認められなかった。

まず、産地数が最も多い苫小牧試験地に植栽された12産地について検討した。これらの産地では、苗齢1年生、2年生および4年生の苗高で産地間に有意差（ $p < 0.01$ ）が認められ、産地の標高と1年生および2年生の苗高との間には、有意な負の相関（ $p < 0.01$ ）が示されている（丸岡・栄花, 1975；丸岡ら, 1973）。本調査で対象とした産地は、緯度では北緯43～45度の狭い範囲に位置するが、標高では、弟子屈の140mから富良野の1,140mの間に1,000m

表 3-4-2 試験地の調査結果

| 試験地 | 林齢<br>(年) | 樹 高 (m) |      |      | 胸高直径 (cm) |      |      | 生 存 率 (%) |      |      |
|-----|-----------|---------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
|     |           | Avg.    | Max. | Min. | Avg.      | Max. | Min. | Avg.      | Max. | Min. |
| 苫小牧 | 21        | 7.5     | 8.3  | 7.1  | 11.9      | 13.5 | 10.3 | 81        | 93   | 61   |
| 足 寄 | 21        | 7.1     | 7.9  | 6.2  | 8.8       | 10.2 | 7.5  | 80        | 86   | 73   |
| 白 滝 | 19        | 7.1     | 7.3  | 6.7  | 9.7       | 10.3 | 9.0  | 88        | 92   | 84   |

Avg.: 平均値, Max.: 最大値, Min.: 最小値。

表 3-4-3 樹高、胸高直径および生存率の  
分散分析による有意差

| 試験地 | 樹 高 | 胸高直径 | 生存率 |
|-----|-----|------|-----|
| 苫小牧 | **  | *    | n.s |
| 足 寄 | **  | **   | n.s |
| 白 滝 | n.s | *    | n.s |

\*\* : 危険率1%水準で有意,

\* : 危険率5%水準で有意, n.s : 非有意。

の標高の差がある(表3-4-1)。母樹産地の標高と次代の成長の関係については、標高の高い産地の次代ほど成長が遅いと言われている(倉橋・濱谷, 1982)。それぞれの産地について、土壌母材別の標高と林齢21年生の樹高の関係を図3-4-2に示した。既に、丸岡ら(1973)によって指摘されているように、産地の標高と樹高との間に、相関係数 $-0.677$ の有意な負の相関( $p < 0.05$ )が示された。

育梁山脈の西部地域の産地は、東部地域の産地より苗木の成長が良く、蛇紋岩を土壌母材とする産地の成長が優れていると言われている(岡田, 1975)。しかしながら、本調査における西部地域の中川、中頓別、芦別、美瑛、大雪および富良野産の平均樹高が7.6mを示し、一方、東部地域の弟子屈、清里、本別、置戸、足寄および丸瀬布産の平均樹高が7.5mを示しており、両地域における樹高には大きな差がないことが判明した。

一方、土壌母材については、蛇紋岩、安山岩および泥炭地からの種子から育苗された苗木の成長では、土壌母材の間に有意差がないことが報告されている(工藤ら, 1998; 門松ら, 1999)。本研究における蛇紋岩の3産地の平均樹高8.1mは、安山岩の8産地の平均樹高7.4mと比べて0.7m高い値を示した。その要因のひとつは、蛇紋岩では平均標高が400m、安山岩では710mであることから、土壌母材が分布する産地の標高の違いである可能性が推察される。従って、成長と産地の土壌母材との間に、有意な関係が存在しないことが示唆される。

つぎに、試験地間の相互関係を検討するため、苫小牧、足寄および白滝試験地に共通した5産地を標高の低い順に並べて、樹高および胸高直径を図3-4-3に示した。3ヵ所の試験地に共通して、標高が1000mを超える大雪産が、樹高と胸高直径ともに最も低い値を示した。一方、弟子屈産は、足寄および白滝試験地の樹高、胸高直径ともに最も良好な成長を示したが、苫小牧試験地ではそのような傾向を示さなかった。これらの結果、それぞれの産地における環境適応性が異なり、産地と試験地との間に交互作用が存在することが推察される。

トドマツの垂直分布に伴う遺伝的変異に関する研究から、トドマツの種苗配布区域の区分に当たっては、地理的

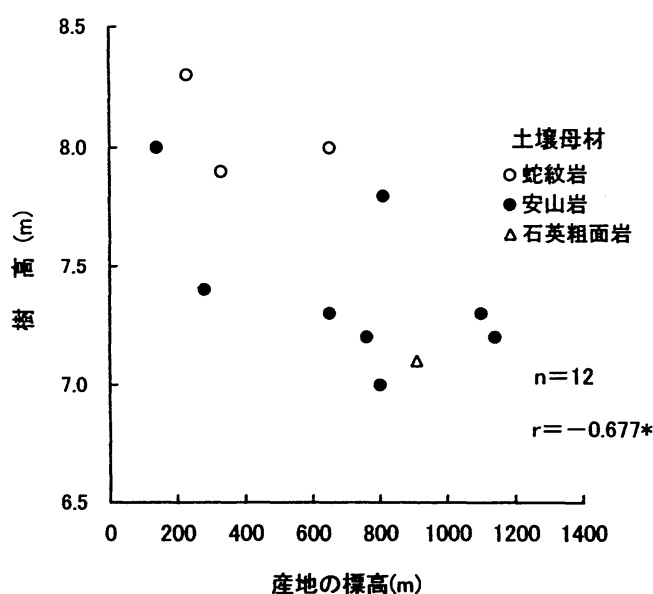


図3-4-2 苫小牧試験地における産地の標高と林齢21年生の樹高の関係

n : 産地数, \* 危険率5%水準で有意。

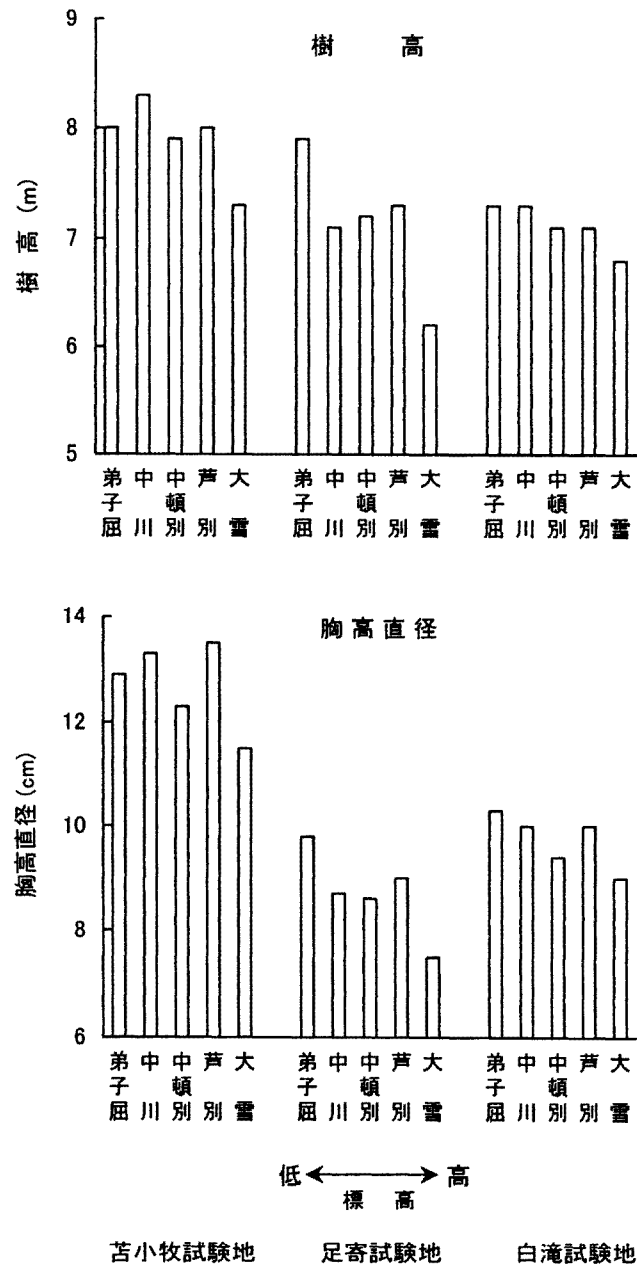


図3-4-3 3ヵ所の試験地に共通した5産地の樹高および胸高直径

変異に併せて垂直的変異を考慮する必要があることが提言されてきた（倉橋・濱谷，1981；倉橋・木佐貫，1995；倉橋ら，1990，1993）。アカエゾマツについても種子産地の標高が，東西地域および土壌母材と比べて，その家系の成長に影響を与えていることが示唆される。特に標高の高い産地の家系，本研究での大雪産は，複数の試験地で成長が遅かったことから，取り扱いに注意する必要がある。

今後，それぞれの産地の環境適応性を把握するため，各産地と試験地の降水量，積雪量，気温に関する気象データを分析するとともに，産地の成長と環境との間の交互作用に関する調査をする必要がある。

## 4.3.2 容積密度数の産地間比較

容積密度数を調査するため、遠軽試験地の胸高部位から円板を採取した。供試円板は、平均直径が13.2 (± 2.0) cm、平均年輪数が18 (± 1) であり、主に未成熟材に相当する部位で占められていると推察される。容積密度数と年輪幅について、髄から樹皮に向かう半径方向の変動を図3-4-4に示した。また胸高直径、容積密度数と年輪幅の測定結果および産地を要因とした分散分析の結果を表3-4-4に示した。容積密度数と年輪幅における平均は、髄から樹皮に至る測定部位の平均値を示し、樹心部は6-15年輪の測定部位である。

容積密度数の平均で333 (± 16) kg/m<sup>3</sup>、年輪幅は3.4 (± 0.5) mmを示した。容積密度数は、髄周辺が高く、年輪数が増加するに従って減少し、16年輪以降で再び高い値を示した。年輪幅は、髄から10年輪までは4.0mm前後であったが、11年輪以降では急激に3.0mm以下に減少した。

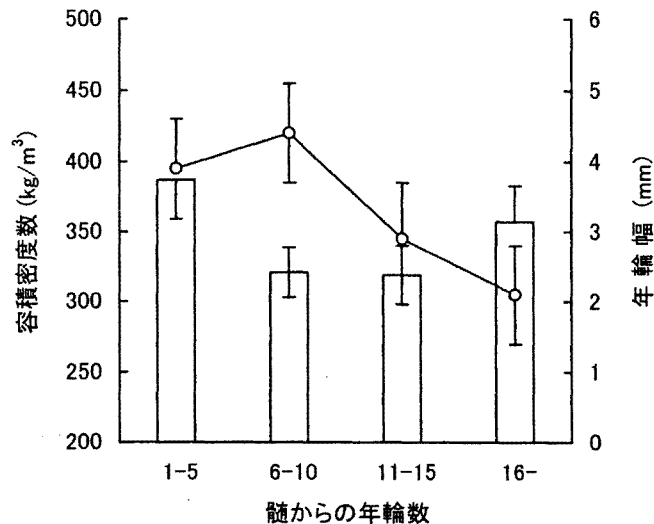


図 3-4-4 容積密度数と年輪幅の半径方向の変動

□ 容積密度数    ○— 年輪幅

垂直線の範囲: 標準偏差。

表 3-4-4 遠軽試験地における胸高直径、容積密度数および年輪幅の測定結果および産地を要因とした分散分析結果

| 形 質                        | Avg. | Max. | Min. | 自 由 度 |     | 平 均 平 方 |         | 分散比       |
|----------------------------|------|------|------|-------|-----|---------|---------|-----------|
|                            |      |      |      | 産地間   | 産地内 | 産地間     | 産地内     |           |
| 胸高直径 (cm)                  | 13.2 | 14.0 | 12.1 | 7     | 56  | 3.893   | 4.092   | 0.951 n.s |
| 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |      |      |       |     |         |         |           |
| 平 均                        | 333  | 350  | 321  | 7     | 56  | 624.069 | 222.574 | 2.804 *   |
| 樹心部                        | 320  | 337  | 309  | 7     | 56  | 579.379 | 204.895 | 2.828 *   |
| 年 輪 幅 (mm)                 |      |      |      |       |     |         |         |           |
| 平 均                        | 3.4  | 3.7  | 3.2  | 7     | 56  | 0.218   | 0.264   | 0.826 n.s |
| 樹心部                        | 3.6  | 3.9  | 3.4  | 7     | 56  | 0.233   | 0.458   | 0.509 n.s |

Avg.: 平均値, Max.: 最大値, Min.: 最小値。

\*: 危険率5%水準で有意, n.s: 非有意。

樹心部は、髄から6-15年輪の部位を示す。

容積密度数は、全体と樹心部で産地間に有意差 ( $p < 0.05$ ) が認められたが、胸高直径と年輪幅には産地間に有意差が認められなかった。アカエゾマツの造林地の胸高直径は、採種園と比べて、林齢が増加するに従って隣接木間の競争や干渉の影響が生じ、遺伝的特性の発現が抑制されることが推察されている(飯塚ら, 2000b)。供試個体の胸高部位では、髓から11年輪以降の年輪幅が3 mm以下に急激に減少していることが観察された。このため、胸高直径の産地間に有意差が認められなかった要因のひとつとしては、当林分では、植栽木の成長に伴う林冠の閉鎖に伴い、隣接木の競争や干渉が生じ、そのため遺伝的特性の発現が抑制されたことが推察される。一方、容積密度数は、直径成長と比べて反復率が高く、再現性があることが示唆されている(飯塚ら, 2000a)ことから、産地間に有意差が認められたと考えられる。

次に、脊梁山脈の西部と東部地域に区分し、容積密度数と年輪幅の平均値を要因にした  $t$  検定の結果を表3-4-5に示した。西部地域は、それぞれ士別、芦別および山部、そして東部地域は、丸瀬布、清里、置戸、足寄および本別の産地である。西部地域の容積密度数は、東部地域に比べて低い値を示し、有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められたが、年輪幅では有意差が認められなかった。産地別の容積密度数を図3-4-5に示した。精英樹クローンにおいて、士別、中頓別産の北部地域は、本別、弟子屈産などの東部地域と比べて容積密度数は低く、有意差が認められている(飯塚ら, 1999a) が、本研究の士別産は本別産よりも低い値を示し、精英樹クローンにおける結果と同じ傾向を示した。標高が910mと最も高い丸瀬布産の容積密度数が、最も高い値を示した。標高別の9ヵ所の母樹から採種・育苗され、標高230mに植栽されたトドマツの丸太の密度、ヤング係数および仮道管長は、標高900mまでとそれ以上の標高のものでは異なり、標高900m以下の起源のものは、それらの形質に多少の差異や変動がみられるが、大きな差は認められていない(中村, 1995)。従って、丸瀬布産に見られたように標高が特に高いことが、容積密度数に影響を与えている可能性が考えられる。

今後、複数の試験地について産地毎の材質の特徴を把握するとともに、材質と環境との交互作用の有無を明らかにする必要がある。

表 3-4-5 脊梁山脈の西部と東部地域における容積密度数と年輪幅の測定結果  
および  $t$  検定の結果

| 形 質                       | 西部地域 |      | 東部地域 |      | $t$ 検定の結果 |           |
|---------------------------|------|------|------|------|-----------|-----------|
|                           | Avg. | Std. | Avg. | Std. | 自由度       | $t$ 値     |
| 容積密度数(kg/m <sup>3</sup> ) | 326  | 15   | 338  | 16   | 62        | 2.961 **  |
| 年輪幅 (mm)                  | 3.4  | 0.6  | 3.4  | 0.4  | 62        | 0.289 n.s |

\*\*：危険率1%水準で有意, n.s: 非有意。  
Avg.: 平均値, Std: 標準偏差。

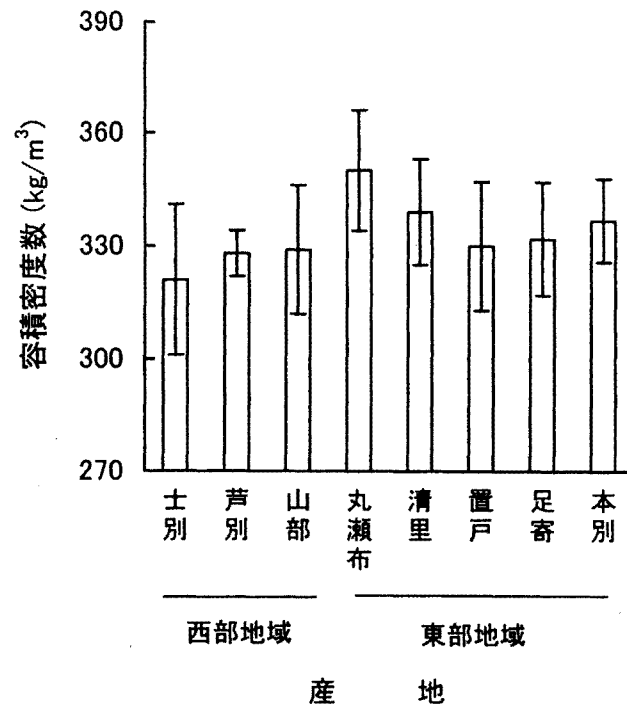


図 3-4-5 8 産地における容積密度数

垂直線の範囲：標準偏差。

#### 4.4 要 旨

アカエゾマツの産地間変異と環境適応性を検討するため、産地試験地における成長、生存率および容積密度数を対象に調査した。その結果は、以下のとおりである。

- (1) 調査した3ヵ所の試験地の樹高あるいは胸高直径において、産地間に有意差が認められた。生存率では、いずれの試験地においても産地間に有意差が認められなかった。
- (2) 苫小牧試験地における12産地では、産地の標高とそれぞれの家系の樹高との間に、有意な負の相関が示された。また、3ヵ所の試験地に共通して、標高の高い大雪産の成長が遅いことが認められた。これらの結果は、成長と産地の土壌母材との間に、有意な関係が存在しないことを示唆している。
- (3) 遠軽試験地における8産地の容積密度数で産地間に有意差が認められ、標高の最も高い丸瀬布産の容積密度数が最も高い値を示した。また、脊梁山脈の西部地域の産地は、東部地域と比べて容積密度数が低く、有意差が認められた。
- (4) 以上の結果から、種苗の配布地域を定める基準として、母樹の標高および東西地域における成長・材質特性を考慮することが重要であることが示唆された。

#### 第5節 総 括

複数の採種園および育種素材保存園に植栽されているアカエゾマツ精英樹クローン、並びに産地毎に育成した苗木を植栽した複数の試験林の成長および材質を調査した。精英樹クローンは林齢30年、産地試験地は林齢20年程

度を対象とした。得られた結果から、以下の結論を得た。

- (1) アカエゾマツ精英樹クローンは、樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数、節枝径、節枝数、節枝径比率および節枝面積率にクローン間で有意差が認められた。生材丸太の動的ヤング係数は、容積密度数との間に有意な正の相関 ( $p<0.01$ ) が示され、丸太径および節枝数との間に有意な負の相関 ( $p<0.05$ ) が示された。

アカエゾマツ精英樹クローンは、諸形質でクローン間変異が認められたため、これらの形質では育種的な改良の余地がある可能性が示唆された。

- (2) 樹高、胸高直径および容積密度数について、遠隔地に植栽された共通クローン間には、有意な正の相関が示された。このため、保存園でのクローンの成長と材質の調査結果が、遠隔地にある共通クローンの相対的な評価に有効であることが示唆された。

成長形質の反復率は、樹高で0.24～0.57、胸高直径で0.43～0.67を示した。容積密度数の反復率については、辺縁部で0.80、樹心部で0.71の高い値が得られた。この結果から、成長形質である樹高と胸高直径の遺伝的要因の寄与が、比較的高いことが示唆されたが、材質形質である容積密度数は、それらの成長形質と比べて、より遺伝性が高く再現性のある形質であると考えられた。

- (3) 容積密度数、動的ヤング係数および各節枝形質で産地間に有意差が認められた。産地の標高とその次代の樹高との間に、有意な負の相関が示された。しかし、産地の土壌母材と次代の成長との間に、有意な相関が存在しないことが推察された。さらに容積密度数については、脊梁山脈で区分した東部地域は、西部あるいは北部地域に比べて高い値を示し、有意差が認められた。

従って、種苗の配布地域を定める基準として、母樹の標高および東西地域における成長・材質特性を考慮することが重要である。

- (4) 以上の結果から、アカエゾマツは、成長および材質諸形質に関してクローン間に有意差が認められ、また産地間変異の存在が示唆された。それらの形質は遺伝的要因の寄与が高く、特に、容積密度数は高い反復率を示し、再現性の高い形質であると考えられることから、育種的改良効果が高いことが期待される。

今後、両親クローンと子供家系の関係および狭義の遺伝率を推定して、その結果に基づいた採種園の管理を行うことで、優良種苗の生産を目指す必要がある。

## 第4章 トドマツの材質変異と育種

### 第1節 従来の研究および本研究の目的

北海道では、1957年に全国に先がけて拡大造林計画が打ち出され、郷土樹種であるトドマツ (*Abies sachalinensis*) および本州から導入されたカラマツが、積極的に植林された (林政総合協議会, 1980)。トドマツについては、拡大造林が進むにつれて、気象害 (今田・佐々木, 1959) や先枯れ病 (横田, 1979) が各地に発生し、一斉造林の弊害が起きた。このため林木育種の観点から、種苗特性、気象害抵抗性、諸形質の産地間変異に関する調査・研究が進められた。その結果、トドマツの耐凍性や雪害抵抗性に産地間で変異のあることが明らかにされた (岡田, 1983; 栄花, 1984; 畠山, 1987)。

一方、トドマツ造林木の材質に関する調査・研究により、低密度材が現れること、心材の局所的な高含水率領域である水食い材の発生が異常に多いこと、髄周辺で乾燥ねじれが生じることが指摘されてきた (宮島, 1980, 1981,

1982a)。容積密度数は、パルプの収量や木材強度と関係のある重要な材質指標（佐伯，1985）であるため、低密度材の出現は、トドマツ材の経済的価値を低くする原因のひとつである。また森林の炭素固定能は、炭素量が材積に比例するため、主に容積密度数に基づいて評価されている（白石ら，1997）。このことから、高い炭素固定能を有する容積密度数の高いトドマツが望まれる。

また、水食い材ときわめて密接な関係のある凍裂（石田，1955，1963，1986；佐野，1996；今川，1997）は、人工林と天然林を問わず、北海道全域にわたり発生している（今川・真田，1996）。さらに水食い材は、乾燥工程において乾燥効率の低下、乾燥むら、割れや落ち込みの発生の原因になる（石田，1983a, b）。トドマツの水食い材と正常材の強度には有意差は認められないが、水食い材の使用に際しては十分に乾燥させる必要のあることが指摘されている（吉本ら，2000）。このように、トドマツにおける水食い材の存在は、林業および林産業において重大な問題となっている。

材質育種的な観点からの調査・研究において、トドマツの容積密度数については、精英樹のクローン間（片寄ら，1992；Katayose *et al.*, 1992；工藤ら，1993；Kadomatsu *et al.*, 1994）および家系間（鈴木ら，1997）で有意差が認められ、また、産地間変異の存在が明らかにされており（松崎，1999a, 1999b）、トドマツの容積密度数には、遺伝変異があると考えられている。しかし、精英樹などの遺伝的素性のはっきりした実生家系の材質変異の情報は限られており（川口ら，1989；高橋ら，1993；鈴木ら，1997，鈴木，2000）、材質の育種的な改良を進めるために重要な、狭義の遺伝率を推定した報告は見られない。

一方、重大な欠点となる心材含水率については、クローン間差（片寄ら，1992；Katayose *et al.*, 1992；工藤ら，1993；Kadomatsu *et al.*, 1994）および産地間変異（松崎ら，1996；松崎，1999a）が認められている。このため、心材含水率は遺伝する形質である可能性の高いことが推察される。また、精英樹クローンの含水率の樹幹内変動を調査した事例がある（飯塚ら，1996a）。しかし、トドマツの心材含水率（水食い材）の遺伝変異についての報告は少なく、心材含水率に関する育種的な改良の余地の有無を明らかにするために、情報の蓄積を図る必要がある。

本章では、従来の研究を踏まえて、トドマツの材質変異に関して、成長特性を考慮しながら調査・研究を進めた。まず第2節では、採種木に用いる精英樹クローンの基本的な木材の性質について議論する。基本的な木材の性質として、容積密度数、動的ヤング係数、節枝形質および生材含水率について検討した。次に第3節では、複数の採種園に植栽されている精英樹クローンの成長形質を調査した。また、精英樹クローンの胸高直径、容積密度数、年輪幅、水食い材率および動的ヤング係数の反復率を算出した。第4節では、自然交配家系、人工交配家系、並びにトドマツを母樹、ウラジロモミおよびシラベを花粉親としたモミ属の種間雑種を供試して、容積密度数に関する育種的な改良効果の可能性を検討した。さらに、両親クローンと子供家系の親子回帰から、容積密度数の狭義の遺伝率を推定した。最後に第5節では、得られた結果に基づき、トドマツの材質変異および容積密度数に関する育種的な改良の可能性を総括した。

## 第2節 精英樹クローンの基本的な木材の性質

### 2.1 はじめに

トドマツの育種種苗の供給、普及の向上を図るため、および人工交配に用いるための母樹と花粉親の材質特性を把握する目的で、精英樹クローンの材質に関する調査を行った。

トドマツ精英樹クローンの材質に関しては、容積密度数でクローン間変異のあることが知られている（片寄ら，

1992; Katayose *et al.*, 1992; 工藤ら, 1993; Kadomatsu *et al.*, 1994)。しかし精英樹クローンについて、材強度と関係があると考えられる動的ヤング係数に関する報告が見られない。

一方、トドマツの水食い材は凍裂と密接な関係があり、重大な欠点となっている。しかし、トドマツの水食い材については、乾重量ベースの生材含水率の数値の基準が定められていない(日本木材学会, 1972)。水食い材を樹幹内で特定することは必ずしも容易でなく、軽度の水食い材の判断は難しい(石田, 1986)と言われているが、心材含水率の頻度分布からトドマツの水食い材の含水率を50%以上(蕪木, 1973)、あるいは120%以上(石井・深沢, 1987)と見積った報告がある。また、トドマツの水食い材について、樹幹木口面における出現の形態的な特徴から、放射状水食い、輪状水食い、全面水食い等に区分されるという報告(加納・蕪木, 1953)や、樹幹内の含水率分布は4タイプに類型化されるが、個体により多様なパターンを示すという報告(蕪木, 1973)もある。

本節では、トドマツ精英樹クローンについて、容積密度数、動的ヤング係数、節枝形質を対象に、クローン間変異および形質間の相互関係、並びに生材含水率に関する基礎的な知見を得る目的で調査を行った。生材含水率の大小を問題とする場合、生材含水率と密度との間に密接な関係があるため、必ず密度も加えて検討する必要がある(三輪, 1996)。従って、胸高部位の生材含水率と容積密度数を対象に、クローン間変異および形質間の相互関係について検討した。

## 2.2 材料と方法

### 2.2.1 材質諸形質の調査

#### 2.2.1.1 材料

材料のトドマツ精英樹クローンは、北海道育種場の育種素材保存園の平坦地から供試した。それぞれのクローンは、苗間が2 m、列間が4 m間隔の列状で植栽されている。林齢35年を対象にして、1995年11月に1本おきに伐採した初回間伐木から、林縁木、主幹折れや凍裂痕等の損傷が樹幹に観察されなかった個体を供試した。1クローンにつき2～7個体で平均3.7個体の計33クローン122個体である。それぞれの供試個体では、林分内の位置による生育環境の差は少ないと考えられた。

#### 2.2.1.2 容積密度数の測定

伐採後、枝払いした供試個体の胸高部位から厚さ10cmの円板を採取した。その円板について、髄から樹皮に至る半径方向の容積密度数と年輪幅を測定するため、髄を頂点とした扇形試験片(中心角30度)を切り出し、髄から20年輪までは5年輪単位の4個の試験体、21年輪以降で1個の試験体を作製し、容積密度数と年輪幅を測定した。なお、容積密度数(Bd)を次式により算出した。また生材体積Vg (cm<sup>3</sup>)は、水中浮力法により求めた(加納, 1973a)。

$$Bd \text{ (kg/m}^3\text{)} = (Wo / Vg) \times 1000$$

全乾重量: Wo (g), 生材体積: Vg (cm<sup>3</sup>)。

#### 2.2.1.3 動的ヤング係数の測定

伐採した丸太の地上高2 mから4 mの部位を、材長2 mに採材して調査に供した。生材丸太の動的ヤング係数は、丸太の一端をプラスチックハンマーで打撃し、他端で打撃音をマイクロフォンで収録し、打撃音の一次の固有振動数から算出した。生材丸太の密度は、平均断面式により丸太の元口径と末口径から求めた丸太の平均径と生材丸太

重量から求めた。FFTアナライザー（小野測器 CF-1200）を用いて求めた一次の固有振動数から、動的ヤング係数（Ed）を次式により算出した。

$$E_d = (2fl)^2 \times \rho / g$$

Ed：動的ヤング係数（tf/cm<sup>2</sup>），f：一次固有振動数（Hz），L：材長（cm）， $\rho$ ：生材丸太の密度（g/cm<sup>3</sup>），g：重力加速度（980cm/s<sup>2</sup>）。

#### 2.2.1.4 節枝形質の測定

動的ヤング係数を測定した供試個体では、枝打ちは行われておらず、枝の枯れ上がりが観察されなかったため、全ての節枝は生節枝と判断した。節枝形質については、節枝径、1 m当たりの節枝数（以下、「節枝数」とする）、輪生数および輪生枝上の節枝数の4形質を測定した。測定は、素材の日本農林規格第14条に規定されている素材の欠点の節の測定方法（北海道林産物検査会、1987）に基づき、節ばかまを除いた幹との接線径が1 cm以上の全ての節枝について行った。節枝径（cm）は、「接線径をその節枝径とした全節枝径」/「全節枝径」、そして輪生枝の節枝数は、「全節枝数」/「全輪生枝数」でそれぞれ表した。

#### 2.2.2 生材含水率の測定

##### 2.2.2.1 材料

前述した33クローン（第4章第2節2.1.1材料）のうち24クローンについて、1クローンにつき3個体、計72個体を供試した。伐採後、枝払いされた供試個体について材長4 mの元玉を採材し、剥皮せずに末口と元口の直径および生材重量を測定した。胸高部位から節を避けて厚さ10cmの円板を採取し、速やかにビニール袋に入れ、外気の出入りがないようにビニールテープで注意深く強く締め、-15℃の冷凍庫に保存した。

材質調査に当たり、水食い材部の記録と試験体の作製は、1月と2月に、気温が常に氷点下であった材質検定室で行った。採取した円板を厚さ2.5cmの2枚の円板に鋸断し、木口面を平滑に加工した。1枚目の円板は、生材含水率、水食い材率および心・辺材毎の容積密度数の測定に用いた。2枚目の円板は、水食い材および乾燥心材部の生材含水率の測定に用いた。

##### 2.2.2.2 生材含水率および水食い材率の測定

1枚目の円板では、直径と心材率を測定後、水食い材率および心材・辺材ごとの含水率と容積密度数を測定した。凍結状態下におけるトドマツ木口面を、写真4-2-1に示した。トドマツは淡色心材を持つが、凍結状態下では辺材(a)に相当する外周部が濃色になる。水食い材（高含水率域）(b)では、凍結状態下で濃色（暗褐色）になり、乾燥心材部(c)との識別が肉眼で容易になると報告されている（石田、1955、1963）。このような凍結状態で、心材における濃色の高含水率域と白色の色相の違いから、水食い材部と乾燥心材部を認識し、円板外周部のリング状の濃色域の辺材部を区別し、その形態や領域をOHP用紙上に写して記録した。次に、円板を12等分にみかん割りした扇形の試験体を、さらに心材と辺材に分割し、各円板につき24個、全体で1,728個の試験片を作製し、各試験片の含水率、容積密度数と平均年輪幅を測定した。水食い材率(%)は、1 cm<sup>2</sup>当たり25点の格子板を用いた散点法により、OHP用紙上に記録した水食い材部の面積を算出し、心材面積に占める水食い材部の面積比率として表した。容積密度数は、前述した方法（第4章第2節2.1.2容積密度数の測定）と同様に測定した。また、生材含水率(Mc)を

次式により算出した。

$$Mc (\%) = \{(Wg - Wo) / Wo\} \times 100$$

生材重量：Wg (g) , 全乾重量：Wo (g)。

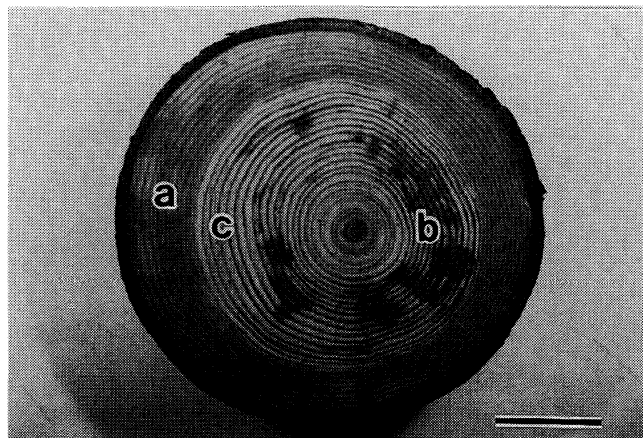


写真 4-2-1 凍結状態下のトドマツ木口面

a：辺材，b：水食い材，c：乾燥心材部。  
スケールバー：4 cm

#### 2.2.2.3 水食い材および乾燥心材部の生材含水率の測定

2枚目の円板を用いて、水食い材と乾燥心材部の生材含水率を測定した。1枚の円板につき、水食い材部と乾燥心材部からそれぞれ2個の小ブロックを作製した。各材部で144個、全体で288個の試験片の生材含水率を測定した。各試験体の生材含水率を、前述した方法（第2章第2.節2.2.2生材含水率および水食い材率の測定）と同様に測定した。

#### 2.2.2.4 元玉丸太の生材密度の測定

材長4 mの元玉丸太の生材密度 (kg/m<sup>3</sup>) は、次式により算出した。

$$\text{生材密度 (kg/m}^3\text{)} = \text{生材重量} / \{(\text{元口径} + \text{末口径})^2 / 4\} \times 3.14 \times \text{材長}$$

### 2.3 結果と考察

#### 2.3.1 材質諸形質の特性

##### 2.3.1.1 クローン間差

それぞれの形質の測定結果およびクローンを要因とした分散分析の結果を、表4-2-1に示した。樹幹胸高部位の平均年輪数は28 (±2) であった。各形質の平均値をみると、樹高が9.4m、胸高直径が15.9cmであった。胸高部位の容積密度数が354kg / m<sup>3</sup>、年輪幅は2.6mmであった。生材状態で測定した丸太の動的ヤング係数は107.1tf / cm<sup>2</sup>であり、その丸太で調査した節枝形質については、節枝径が1.7cm、1 m当たりの節枝数が12.5本、輪生枝数が3.3本および輪生枝の節枝数が3.9本であった。各形質において、クローン間に有意差が認められた。分散比については、

容積密度数が10以上で最も高く、次いで樹高で7.3を示し、年輪幅および各節枝形質の分散比は3以下を示した。このことから、容積密度数は年輪幅に比べて環境の影響を受けにくく、遺伝的要因の寄与の高い形質であることが示唆される。

容積密度数と年輪幅について、髄から樹皮に向かう半径方向の変動を図4-2-1に示した。測定部位における容積密度数は、髄周辺（髄から1～5年輪）が338kg/m<sup>3</sup>と最も低い値を示し、最大値は髄から11～15年輪で366kg/m<sup>3</sup>を示した。その差異の28kg/m<sup>3</sup>は、クローンの範囲の310～410kg/m<sup>3</sup>（表4-2-1）と比べて小さい値となり、半径方向の容積密度数の変動は、クローン間の変動より小さい傾向を示した。年輪幅は、髄周辺が3.1mmと最も広く、年輪数の増加と共に減少し、21年輪以降では2.4mmと小さい値を示した。

各測定部位におけるクローンを要因とした分散分析の結果を、表4-2-2に示した。容積密度数は、髄周辺（髄から1～5年輪）で危険率5%水準、髄から6年輪以降の測定部位で危険率1%水準でクローン間に有意差が認められ

表4-2-1 各形質の測定結果および分散分析結果

| 形 質        |                       | 測 定 結 果 |       |      | 分 散 分 析 結 果 |       |          |         | 分散比       |
|------------|-----------------------|---------|-------|------|-------------|-------|----------|---------|-----------|
|            |                       | Avg.    | Max.  | Min. | 自 由 度       |       | 平 均 平 方  |         |           |
|            |                       |         |       |      | クローン間       | クローン内 | クローン間    | クローン内   |           |
| 樹 高        | (m)                   | 9.4     | 11.8  | 7.1  | 32          | 87    | 4.516    | 0.619   | 7.292 **  |
| 胸高直径       | (cm)                  | 15.9    | 22.0  | 11.8 | 32          | 87    | 20.289   | 4.687   | 4.329 **  |
| 容積密度数      | (kg/m <sup>3</sup> )  | 354     | 410   | 310  | 32          | 87    | 1748.173 | 170.664 | 10.243 ** |
| 年輪幅        | (mm)                  | 2.6     | 3.5   | 2.0  | 32          | 87    | 0.503    | 0.169   | 2.972 **  |
| 動的ヤング係数    | (tf/cm <sup>2</sup> ) | 107.1   | 127.5 | 91.8 | 32          | 87    | 262.449  | 78.367  | 3.349 **  |
| 節枝径        | (cm)                  | 1.7     | 2.1   | 1.4  | 32          | 87    | 0.140    | 0.049   | 2.877 **  |
| 節枝数        | (本)                   | 12.5    | 16.7  | 7.8  | 32          | 87    | 11.903   | 4.693   | 2.536 **  |
| 輪生枝数       | (本)                   | 3.3     | 4.2   | 1.8  | 32          | 87    | 0.867    | 0.294   | 2.941 **  |
| 輪生枝の節枝数(本) | (本)                   | 3.9     | 5.1   | 3.1  | 32          | 87    | 0.802    | 0.353   | 2.273 **  |

Avg.: 平均値, Max.: 最大値, Min.: 最小値。

\*\* : 危険率1%水準で有意。

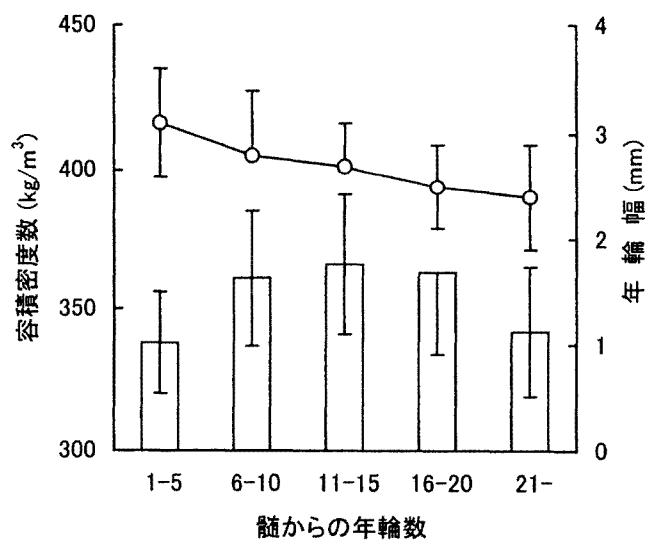


図4-2-1 容積密度数と年輪幅の半径方向の変動

□ 容積密度数      ○— 年輪幅

垂直線の範囲: 標準偏差。

表 4-2-2 容積密度数と年輪幅に関する分析結果

| 形 質   | 測定部位<br>(髄からの年輪数) | 平 均 平 方  |         | 分散比      |
|-------|-------------------|----------|---------|----------|
|       |                   | クローン間    | クローン内   |          |
| 容積密度数 | 1-5               | 936.028  | 587.685 | 1.593 *  |
|       | 6-10              | 2029.268 | 311.792 | 6.508 ** |
|       | 11-15             | 2170.821 | 289.007 | 7.511 ** |
|       | 16-20             | 2658.489 | 280.933 | 9.463 ** |
|       | 21-               | 1881.103 | 268.421 | 7.008 ** |
| 年輪幅   | 1-5               | 0.888    | 0.393   | 2.262 ** |
|       | 6-10              | 1.192    | 0.368   | 3.237 ** |
|       | 11-15             | 0.730    | 0.411   | 1.777 *  |
|       | 16-20             | 0.655    | 0.378   | 1.734 *  |
|       | 21-               | 0.757    | 0.353   | 2.147 ** |

\*\*:危険率1%水準で有意, \*:危険率5%水準で有意。

た。分散比は、髄周辺が低く、辺縁部に向かうに従って高い値を示す傾向がみられた。年輪幅では、髄周辺部位を除いた全測定部位において、容積密度数より低い分散比を示し、11-15年輪と16-20年輪の部位で危険率5%水準、それ以外の測定部位で危険率1%水準でクローン間に有意差が認められた。このことから、容積密度数は、樹心部と比べて辺縁部で遺伝的要因の寄与が高く、また年輪幅は、容積密度数よりも遺伝的要因の寄与の低い形質であると考えられる。

### 2.3.1.2 形質間の相互関係

それぞれの形質間の相関係数を表4-2-3に示した。樹高と胸高直径との間には、有意な正の相関が示され、両形質は、輪生枝数との間に有意な負の相関、輪生枝の節枝数との間に有意な正の相関を示したが、節枝数との間には有意な関係はなかった。胸高直径は、節枝径との間に有意な正の相関を示したが、容積密度数および動的ヤング係数との間に、有意な相関は見られなかった。容積密度数と動的ヤング係数との間には、有意な正の相関が示されたが、両形質は、胸高直径との間に有意な関係を示さなかった。また動的ヤング係数は、節枝形質との間に有意な相関を

表 4-2-3 成長、材質および節枝諸形質における形質間の相関係数

| 略号   | 形 質     | H          | DBH        | Bd         | Arw       | Ed         | Dk         | Nk        | Nwb       | Nkwb  |
|------|---------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-------|
| H    | 樹高      | 1.000      |            |            |           |            |            |           |           |       |
| DBH  | 胸高直径    | 0.758      | 1.000      |            |           |            |            |           |           |       |
| Bd   | 容積密度数   | -0.090 n.s | -0.335 n.s | 1.000      |           |            |            |           |           |       |
| Arw  | 年輪幅     | 0.717 **   | 0.801 **   | -0.205 n.s | 1.000     |            |            |           |           |       |
| Ed   | 動的ヤング係数 | 0.390 *    | 0.092 n.s  | 0.518 **   | 0.123 n.s | 1.000      |            |           |           |       |
| Dk   | 節枝径     | 0.354 *    | 0.711 **   | -0.160 n.s | 0.502 **  | -0.031 n.s | 1.000      |           |           |       |
| Nk   | 節枝数     | -0.118 n.s | -0.039 n.s | 0.304 n.s  | 0.030 n.s | 0.082 n.s  | -0.193 n.s | 1.000     |           |       |
| Nwb  | 輪生枝数    | -0.516 **  | -0.418 *   | 0.368 *    | -0.440 *  | -0.137 n.s | -0.326 n.s | 0.655 **  | 1.000     |       |
| Nkwb | 輪生枝の節枝数 | 0.469 **   | 0.435 *    | -0.150 n.s | 0.593 **  | 0.239 n.s  | 0.134 n.s  | 0.306 n.s | -0.498 ** | 1.000 |

供試クローン数:33。

\*\*:危険率1%水準で有意, \*:危険率5%水準で有意, n.s.:非有意。

示さなかった。輪生枝数と輪生枝の節枝数との間に、有意な負の相関が示された。単位長さ当たりの輪生枝数と密接な関係のある節間の長さは、集成材の利用を考えた場合、歩留まりに影響する重要な形質である（太田，1997）が、成長の良好なクローンは輪生枝と輪生枝の間の節間が長く、また輪生枝当たりの節枝数が多くなる傾向が示唆された。また、胸高直径と材質形質との間には、有意な関係が認められなかった。ここで、動的ヤング係数を目的変数とし、髓から21年輪以降の容積密度数と輪生枝数を説明変数とする重回帰分析をした結果、重相関係数が0.736となり、動的ヤング係数の推定の精度が向上した。従って、動的ヤング係数は、容積密度数と輪生枝数による影響を受けているものと推察される。

次に、容積密度数と年輪幅について、樹心部と辺縁部の関係を検討した。まず、容積密度数に関して、樹心部を髓付近を除いた髓から6－10年輪とし、辺縁部を21年輪以降の測定部位とした両部位の関係を図4-2-2に示した。両部位の間には、相関係数0.773の有意な正の相関が示された。年輪幅に関しては、樹心部を髓から6－10年輪とし、辺縁部を16－20年輪（辺縁部①）および21年輪以降（辺縁部②）に区分した両部位の関係を図4-2-3に示した。樹心部と辺縁部①16－20年輪との間には、相関係数0.630の有意な正の相関が示されたが、21年輪以降の測定部位（辺縁部②）との間には、有意な相関が示されなかった。このことから、容積密度数については、髓付近を除いた樹心部でクローン間変異の評価ができる可能性のあることが示唆された。しかし、年輪幅を用いて樹心部の値から辺縁部の成長の良否を評価することは、容積密度数に比べて難しいと考えられる。

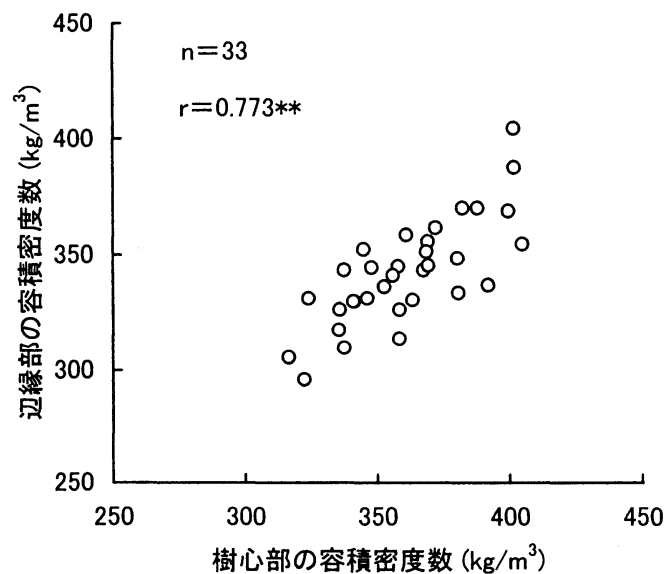


図 4-2-2 容積密度数における樹心部と辺縁部の関係

樹心部：髓から6－10年輪の部位。

辺縁部：髓から21年輪以降の部位。

n：クローン数。

\*\*：危険率1%水準で有意。

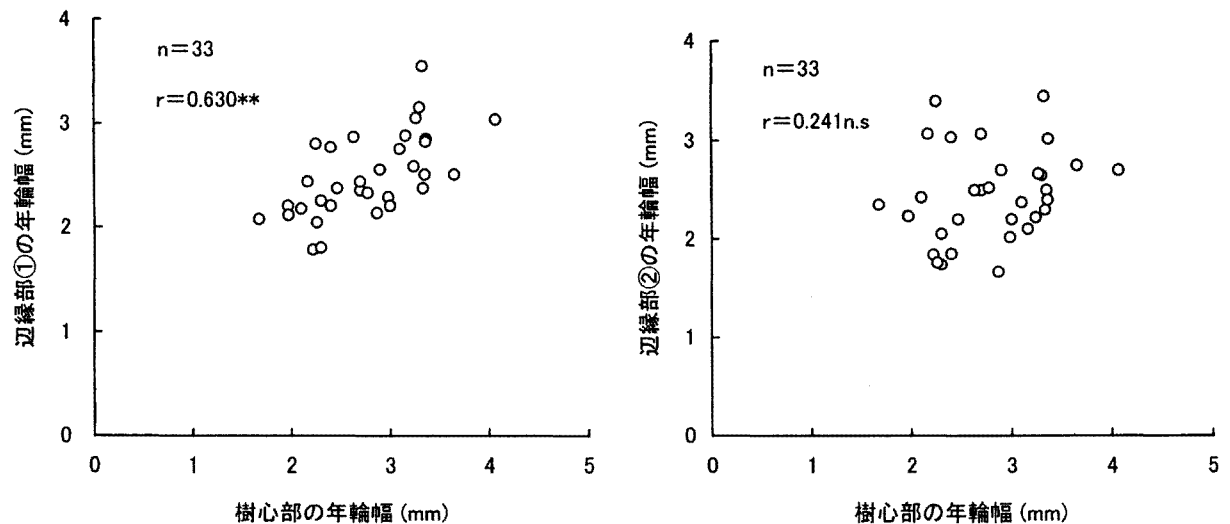


図4-2-3 年輪幅における樹心部と辺縁部（①と②）の関係

樹心部：髄から6－10年輪の部位。  
 辺縁部①：髄から16－20年輪以降の部位。  
 辺縁部②：髄から21年輪以降の部位。  
 n：クローン数。  
 \*\*：危険率1%水準で有意。  
 n.s：非有意。

## 2.3.2 生材含水率の特徴

### 2.3.2.1 クローン間差

供試した24クローンについて、各形質における測定値の範囲を表4-2-4に示した。各形質の測定値の範囲は、樹高で6.8～11.8m、胸高直径で11～25cm、心材率で62～83%、水食い材率で1～65%、心材含水率で35～135%、辺材含水率で150～246%であった。容積密度数では、心材で312～422kg/m<sup>3</sup>、辺材で293～401kg/m<sup>3</sup>となり、元玉丸太の生材密度では、0.74×103～1.30×103kg/m<sup>3</sup>であった。

心材含水率と水食い材率は変動係数30%以上であり、樹高、胸高直径、心材率、辺材含水率、容積密度数および元玉丸太の生材密度よりも、大きなバラツキを示した。水食い材は、全ての個体に観察された。クローン毎の心材含水率をみると、陸別102では35～38%の低い値を示したが、根室101、置戸102および苫小牧4では、3個体ともに100%以上の高い値を示した。特に高い心材含水率と水食い材率を示した、クローンの水食い材の木口面での出現の形態的な特徴では、根室101と置戸102が、木口面上のほぼ全域にわたり不規則に水食い材が出現したのに対して、苫小牧4では、偏った領域にまとまって水食い材が出現しているのが観察された。容積密度数については、陸別102、中頓別102が高く、足寄111、大夕張101が低い値を示し、その差は各クローン3個体の平均値で、50kg/m<sup>3</sup>以上を示した。

それぞれの形質に関して、クローンを要因とした分散分析の結果を表4-2-5に示した。樹高、胸高直径、水食い材率、心・辺材の各含水率、心・辺材の各容積密度数および元玉丸太の生材密度に危険率1%水準、心材率に危険率5%水準でクローン間差が認められた。特にトドマツの心材含水率に関しては、分散分析から算出した反復率は、研究材料によって異なっているが、これまで得られた反復率は、0.27（片寄ら，1992）、0.34（Katayose *et al.*, 1992）、

0.30～0.56（工藤ら，1993）および0.43（Kadomatsu *et al.*, 1994）であるため，心材含水率の反復率は比較的高い形質であると考えられている。本研究の結果からも，トドマツの心材含水率は，遺伝的要因の寄与が比較的高いことが示唆される。

表 4-2-4 クローン毎の各形質の測定結果

| クローン名    | 樹 高<br>(m)  | 胸高直径<br>(cm) | 心材率<br>(%) | 水食い材率<br>(%) | 生材含水率 (%) |           | 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> ) |           | 生材丸太の密度<br>(×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------|-------------|--------------|------------|--------------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|--------------------------------------------------|
|          |             |              |            |              | 心 材       | 辺 材       | 心 材                        | 辺 材       |                                                  |
| 足 寄 101  | 8.1 ~ 9.7   | 11.5 ~ 16.5  | 63 ~ 71    | 7 ~ 38       | 50 ~ 106  | 197 ~ 210 | 347 ~ 356                  | 329 ~ 336 | 0.89 ~ 1.12                                      |
| 足 寄 104  | 8.3 ~ 10.0  | 14.5 ~ 18.5  | 71 ~ 80    | 24 ~ 52      | 72 ~ 101  | 169 ~ 200 | 356 ~ 384                  | 347 ~ 384 | 0.87 ~ 1.04                                      |
| 足 寄 105  | 7.2 ~ 8.8   | 12.0 ~ 17.0  | 63 ~ 76    | 13 ~ 21      | 67 ~ 73   | 185 ~ 201 | 348 ~ 379                  | 339 ~ 355 | 0.84 ~ 0.98                                      |
| 足 寄 107  | 7.3 ~ 9.0   | 11.0 ~ 15.0  | 70 ~ 79    | 14 ~ 21      | 65 ~ 76   | 190 ~ 212 | 350 ~ 367                  | 329 ~ 362 | 0.85 ~ 1.01                                      |
| 足 寄 111  | 10.0 ~ 10.8 | 18.0 ~ 21.0  | 65 ~ 78    | 25 ~ 30      | 90 ~ 108  | 232 ~ 246 | 312 ~ 334                  | 293 ~ 312 | 0.95 ~ 0.98                                      |
| 足 寄 112  | 7.5 ~ 9.5   | 16.0 ~ 18.5  | 69 ~ 70    | 21 ~ 26      | 56 ~ 91   | 210 ~ 224 | 321 ~ 359                  | 317 ~ 328 | 0.93 ~ 1.07                                      |
| 足 寄 113  | 10.2 ~ 10.5 | 17.5 ~ 19.0  | 72 ~ 75    | 18 ~ 25      | 58 ~ 93   | 201 ~ 209 | 339 ~ 345                  | 333 ~ 338 | 0.77 ~ 0.92                                      |
| 足 寄 115  | 9.5 ~ 10.2  | 13.0 ~ 17.5  | 68 ~ 73    | 6 ~ 15       | 38 ~ 83   | 210 ~ 225 | 331 ~ 363                  | 315 ~ 334 | 0.83 ~ 0.92                                      |
| 足 寄 116  | 8.1 ~ 9.7   | 12.5 ~ 15.5  | 62 ~ 65    | 8 ~ 17       | 40 ~ 50   | 215 ~ 217 | 348 ~ 384                  | 326 ~ 330 | 0.85 ~ 0.93                                      |
| 枝 幸 1    | 11.6 ~ 11.8 | 19.5 ~ 25.0  | 68 ~ 70    | 18 ~ 22      | 64 ~ 79   | 216 ~ 222 | 347 ~ 362                  | 316 ~ 325 | 0.86 ~ 0.93                                      |
| 中頓別 102  | 9.0 ~ 10.0  | 14.5 ~ 17.0  | 70 ~ 75    | 43 ~ 65      | 80 ~ 123  | 178 ~ 192 | 365 ~ 378                  | 359 ~ 381 | 0.89 ~ 1.19                                      |
| 根 室 101  | 7.0 ~ 7.5   | 11.5 ~ 12.5  | 67 ~ 83    | 38 ~ 62      | 110 ~ 130 | 175 ~ 218 | 348 ~ 380                  | 324 ~ 364 | 1.02 ~ 1.30                                      |
| 王 子 1662 | 11.0 ~ 11.8 | 15.0 ~ 21.0  | 70 ~ 73    | 1 ~ 15       | 47 ~ 66   | 203 ~ 228 | 339 ~ 357                  | 309 ~ 338 | 0.74 ~ 0.97                                      |
| 置 戸 102  | 8.0 ~ 9.3   | 15.0 ~ 20.0  | 77 ~ 82    | 40 ~ 55      | 105 ~ 108 | 191 ~ 206 | 331 ~ 348                  | 317 ~ 334 | 0.92 ~ 1.05                                      |
| 大夕張 101  | 9.7 ~ 10.2  | 15.0 ~ 17.0  | 75 ~ 77    | 15 ~ 17      | 62 ~ 80   | 217 ~ 239 | 326 ~ 345                  | 296 ~ 314 | 0.83 ~ 0.86                                      |
| 大夕張 103  | 9.0 ~ 10.0  | 14.5 ~ 17.0  | 67 ~ 74    | 19 ~ 26      | 62 ~ 78   | 223 ~ 235 | 342 ~ 369                  | 307 ~ 317 | 0.82 ~ 0.94                                      |
| 大夕張 110  | 9.5 ~ 10.0  | 12.0 ~ 12.5  | 69 ~ 76    | 14 ~ 27      | 56 ~ 71   | 161 ~ 187 | 386 ~ 422                  | 363 ~ 371 | 0.90 ~ 0.99                                      |
| 陸 別 102  | 8.5 ~ 10.2  | 12.5 ~ 17.5  | 70 ~ 74    | 2 ~ 19       | 35 ~ 38   | 150 ~ 174 | 403 ~ 417                  | 383 ~ 401 | 0.88 ~ 0.93                                      |
| 留辺蘂 101  | 8.2 ~ 9.5   | 12.0 ~ 15.5  | 70 ~ 76    | 20 ~ 63      | 80 ~ 92   | 174 ~ 195 | 367 ~ 386                  | 353 ~ 369 | 0.92 ~ 1.06                                      |
| 下 川 125  | 9.5 ~ 10.0  | 14.5 ~ 16.0  | 69 ~ 70    | 4 ~ 35       | 58 ~ 65   | 194 ~ 219 | 348 ~ 356                  | 324 ~ 349 | 0.92 ~ 0.96                                      |
| 弟子屈 102  | 9.1 ~ 11.0  | 16.0 ~ 18.0  | 68 ~ 74    | 19 ~ 28      | 81 ~ 94   | 188 ~ 230 | 344 ~ 377                  | 317 ~ 350 | 0.93 ~ 0.99                                      |
| 苫小牧 4    | 10.7 ~ 11.2 | 17.0 ~ 18.5  | 67 ~ 75    | 54 ~ 57      | 107 ~ 135 | 210 ~ 226 | 334 ~ 357                  | 316 ~ 341 | 0.91 ~ 0.96                                      |
| 津 別 1    | 8.1 ~ 10.2  | 14.5 ~ 19.5  | 70 ~ 78    | 28 ~ 31      | 58 ~ 72   | 177 ~ 193 | 387 ~ 409                  | 353 ~ 375 | 0.82 ~ 0.98                                      |
| 浦 河 101  | 6.8 ~ 7.5   | 12.5 ~ 14.0  | 67 ~ 71    | 13 ~ 35      | 63 ~ 90   | 185 ~ 215 | 339 ~ 350                  | 322 ~ 353 | 0.85 ~ 1.10                                      |
| 平均       | 9.3         | 15.8         | 72         | 26           | 77        | 204       | 359                        | 338       | 0.94                                             |
| 標準偏差     | 1.3         | 2.8          | 5          | 16           | 24        | 21        | 23                         | 24        | 0.10                                             |
| 変動係数 (%) | 14.0        | 17.7         | 7          | 62           | 31        | 10        | 6                          | 7         | 11                                               |

表 4-2-5 各形質に関する分散分析結果

| 形 質     | 自 由 度 |       | 平 均 平 方   |          | 分散比       |
|---------|-------|-------|-----------|----------|-----------|
|         | クローン間 | クローン内 | クローン間     | クローン内    |           |
| 樹 高     | 23    | 48    | 4.030     | 0.482    | 8.357 **  |
| 胸高直径    | 23    | 48    | 17.766    | 3.549    | 5.006 **  |
| 心材率     | 23    | 48    | 29.739    | 15.688   | 1.896 *   |
| 水食い材率   | 23    | 48    | 573.969   | 87.785   | 6.538 **  |
| 生材含水率   |       |       |           |          |           |
| 心 材     | 23    | 48    | 1446.071  | 166.460  | 8.687 **  |
| 辺 材     | 23    | 48    | 1017.802  | 131.154  | 7.760 **  |
| 容積密度数   |       |       |           |          |           |
| 心 材     | 23    | 48    | 1338.536  | 157.542  | 8.496 **  |
| 辺 材     | 23    | 48    | 1423.188  | 138.361  | 10.286 ** |
| 生材丸太の密度 | 23    | 48    | 16938.940 | 6273.490 | 2.700 **  |

\*\*：危険率 1% 水準で有意，\*：危険率 5% 水準で有意。

### 2.3.2.2 心材の含水率

トドマツで特に問題となる含水率に関して、心材および辺材の含水率の頻度分布を図4-2-4に示した。心材では平均含水率77%，変動係数31%を示した。一方、辺材は平均含水率204%，変動係数は10%であった。多湿心材樹であるヤチダモ（矢沢，1964；Yazawa *et al.*, 1965）には、凍裂が発生しやすいこと（今川ら，1988）が知られている。ヤチダモはトドマツと異なり、心材全体が高含水率を示し、全ての地上高で心材の方が辺材よりも高い含水率を示す（飯塚ら，1999c）。既に指摘されているように（蕪木，1956；矢沢，1964；Yazawa *et al.*, 1965），トドマツ心材の局部的、不規則的に発生する水食い材とヤチダモの多湿心材では、高含水率領域の出現パターンや水分分布は異なると考えられる。

心材の水食い材とそれ以外の部位、即ち乾燥心材部の含水率の頻度分布を図4-2-5に示した。水食い材では、含水率の平均が160%，その範囲は77～244%と大きなバラツキを示した。肉眼的に識別した水食い材の含水率は、80%以上であることが報告されている（石田，1955,1963）。本研究においても既報告と同様に、水食い材の含水率は、ほぼ80%以上を示した。また、辺材含水率の平均が204%（表4-2-4）を示したことから、心材には局部的に、辺材より高い含水率の部位が存在することが示唆される。一方、ヒノキ、アカマツなどの心材は、含水率が30～34%であり、自由水は少なく、水分の大部分は細胞壁中の結合水で占められていることから、乾燥心材と呼ばれている。本研究のトドマツの乾燥心材部では、含水率が28～53%，平均値が36%であったことから、ヒノキ、アカマツなどの乾燥心材の含水率に近い値を示している。以上のことから、トドマツでは個体により心材含水率は大きく異なり、心材の含水率の範囲が、30%台の乾燥心材から240%以上の水食い材が混在することが示唆された。

水食い材率の頻度分布を図4-2-6に示した。前述したとおり、水食い材率は木口面心材部において、心材に占める含水率80%以上の部位の面積比率にほぼ相当すると考えられる。水食い材率は平均で26%，変動係数で62%と大きなバラツキを示した。水食い材率は、供試した74%の個体では30%以下を示したが、13%の個体で50%以上を示した。

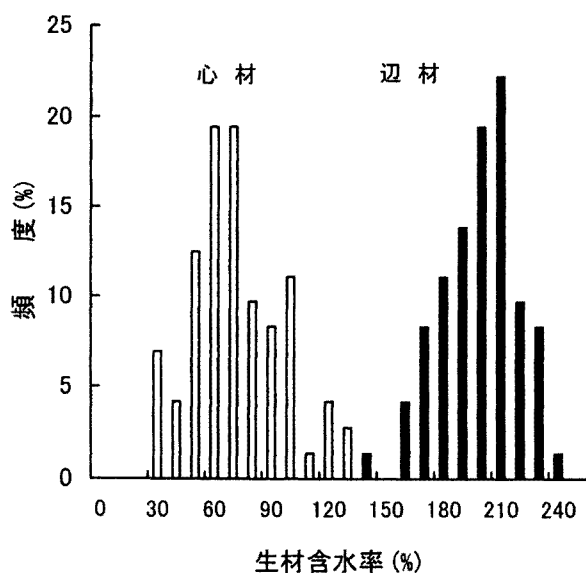


図4-2-4 心材および辺材の生材含水率の頻度分布

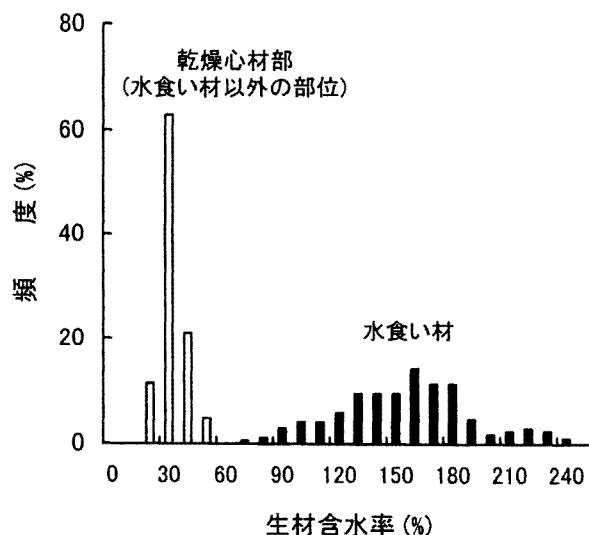


図4-2-5 心材における乾燥部位および水食い材の生材含水率

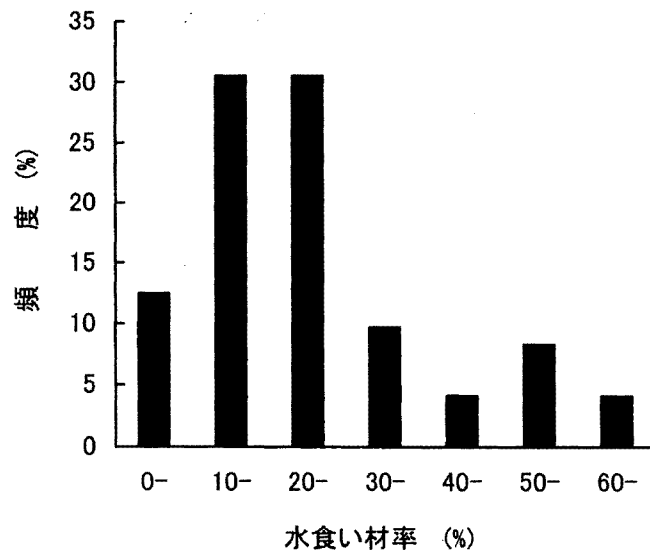


図 4-2-6 水食い材率の頻度分布

### 2.3.2.3 形質間の相互関係

各形質間の相関係数を表 4-2-6 に示した。胸高直径は、心材率、水食い材率および心材含水率との間に有意な相関を示さなかった。同林齢の人工林の場合、胸高直径と凍裂発生との間に関係があるとは考えにくいとされているが(今川, 1997)、図 4-2-7 に示した胸高直径と心材含水率の関係にも、有意な相関が示されなかった。従って、同林齢の人工林では、胸高直径から水食い材の出現割合を推察することは難しいと考えられる。

水食い材率と心材含水率との間に、相関係数 0.811 ( $p < 0.01$ ) の高い正の相関が示された(図 4-2-8)。凍結状態で、心材の高含水率域である水食い材は濃色を示すことから、肉眼で白色の乾燥心材部と区別される(写真 4-2-1 参照)。従って凍結状態下ならば、水食い材率は木口面において、肉眼で心材部の平均含水率の高低を推定できる重

表 4-2-6 胸高直径、心材率、水食い材率、生材含水率、容積密度数および生材丸太の密度における形質間の相関係数

| 略号     | 形 質     | DBH        | Phw        | Pww        | McHW      | McSW      | BdHW     | BdSW  | $\rho$ |
|--------|---------|------------|------------|------------|-----------|-----------|----------|-------|--------|
| DBH    | 胸高直径    | 1.000      |            |            |           |           |          |       |        |
| Phw    | 心材率     | 0.064 n.s  | 1.000      |            |           |           |          |       |        |
| Pww    | 水食い材率   | -0.074 n.s | 0.228 n.s  | 1.000      |           |           |          |       |        |
| Mc     | 生材含水率   |            |            |            |           |           |          |       |        |
| McHW   | 心 材     | 0.034 n.s  | 0.204 n.s  | 0.811 **   | 1.000     |           |          |       |        |
| McSW   | 辺 材     | 0.502 **   | -0.217 n.s |            | 0.078 n.s | 1.000     |          |       |        |
| Bd     | 容積密度数   |            |            |            |           |           |          |       |        |
| BdHW   | 心 材     | -0.429 **  |            | -0.021 n.s | -0.285 *  |           | 1.000    |       |        |
| BdSW   | 辺 材     | -0.459 **  |            |            |           | -0.950 ** | 0.796 ** | 1.000 |        |
| $\rho$ | 生材丸太の密度 | -0.350 **  |            | 0.499 **   | 0.502 **  |           |          |       | 1.000  |

供試個体数: 72。

\*\* : 危険率 1% 水準で有意, \* : 危険率 5% 水準で有意, n.s : 非有意。

要な指標であると考えられる。また、心材の含水率と容積密度数との間に、相関係数 $-0.285$ の低い値が得られ(図4-2-9)、両形質の間に相関が認められていない(飯塚ら, 1996a)。従って、両形質は関連性が低く、比較的独立した形質である可能性が推察される。表4-2-4に示したが、陸別102に代表されるように、心材含水率が低く、かつ容積密度数の高いクローンの存在する可能性が示唆された。このようなクローンは、育種素材として重要である。

一方、図4-2-10に示したように、辺材の容積密度数と含水率との間に、相関係数 $-0.950$  ( $p < 0.01$ ) の高い負の相関が認められた。スギの辺材では個体に関係なく、ほとんど飽水状態である(三輪, 1996)。そのため含水率は、全乾比重、あるいは容積密度数との間に、高い負の相関を示すことが知られている(三輪, 1996; 中田ら, 1998)。

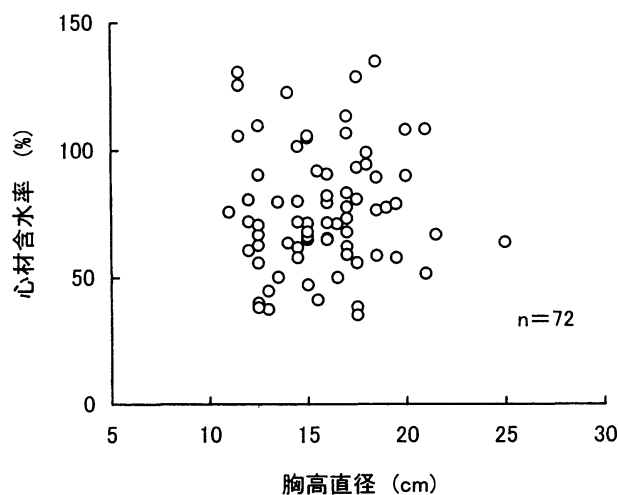


図4-2-7 胸高直径と心材含水率の関係

n : 供試個体数

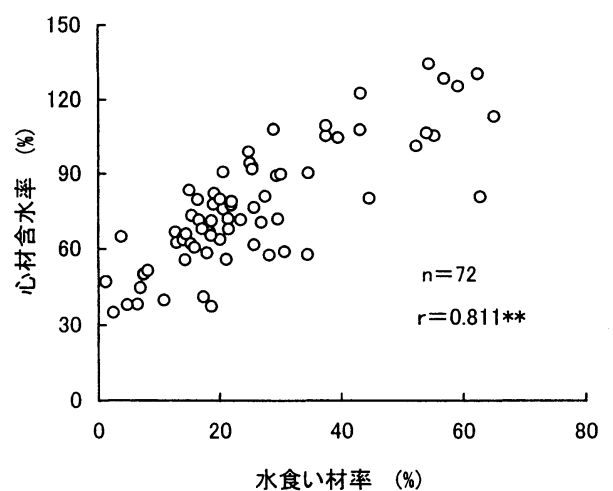


図4-2-8 水食い材率と心材含水率の関係

n : 供試個体数, \*\* 危険率1%水準で有意。

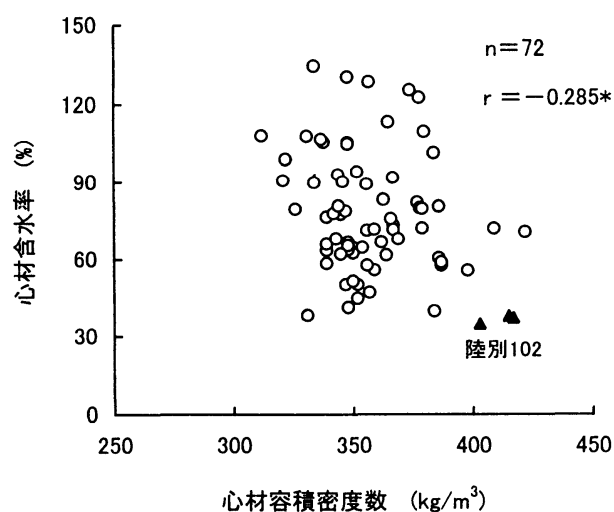


図4-2-9 心材における容積密度数と心材含水率の関係

▲ : 陸別102, n : 供試個体数,  
\* : 危険率5%水準で有意。

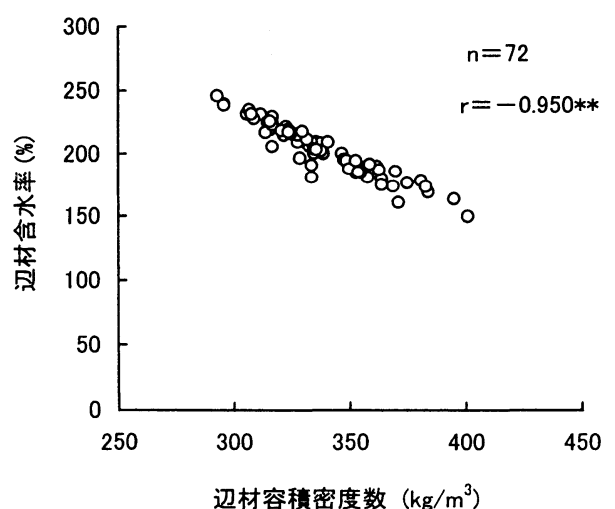


図4-2-10 辺材における容積密度数と心材含水率の関係

n : 供試個体数, \*\* 危険率1%水準で有意。

トドマツでは、辺材の容積密度数の分散比が高く（表4-2-5）、遺伝的要因の寄与が高いことが推察されることから、辺材含水率からも容積密度数の高い個体を選抜できる可能性が示唆された。容積密度数の心材と辺材との間に、相関係数 0.796 ( $p < 0.01$ ) の高い正の相関が示されたが（表4-2-6）、含水率の心材と辺材との間には、有意な相関は認められず、関連性は小さいことが考えられる。

心材含水率と元玉丸太の生材密度との間に、相関係数 0.502 ( $p < 0.01$ ) の正の相関が得られ（図4-2-11）、また、水食い材率と元玉丸太の生材密度との間にも、正の相関が示された（表4-2-6）。トドマツの凍裂痕の大部分は、地上高 0.5～3.0m の間に出現すると言われ（石田, 1952）、地際から地上高 4.2m 間の調査結果では、水食い材の出現比率は胸高部位で高く、地上高が増すとともに低下する傾向が見られている（飯塚ら, 1996a）。従ってトドマツの場合、少なくとも地際から地上高 4 m の間では、丸太の生材密度を大きく左右する要因は、容積密度数や辺材部の含水率ではなく、心材部の含水率と水食い材率であることが示唆された。

これらの結果から、水食い材率が低く、凍裂の危険性が少なく、かつ容積密度数の高い陸別 102 は、採種木として有望であると推察される。さらに、採種母樹および花粉親としての材質に関する遺伝性を明らかにする必要がある。

今後、凍裂の危険性を回避、あるいは軽減するための育種素材の選抜に当たり、凍裂痕以外の外観上での評価や非破壊的な調査法により、水食い材の存在を検知できる技術開発が強く望まれる。

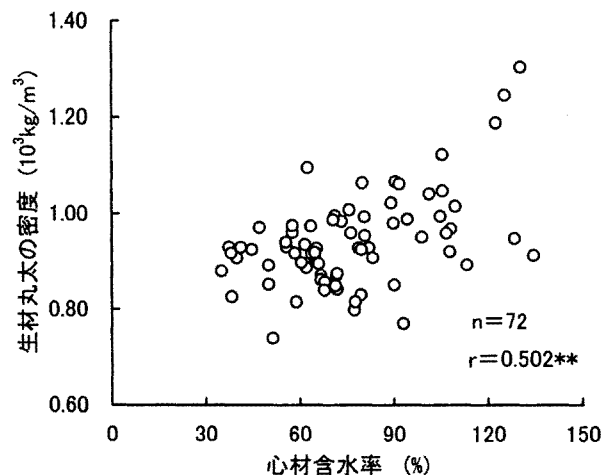


図4-2-11 心材含水率と生材丸太秘密の関係

n：供試個体数，\* 危険率1%水準で有意。

## 2.4 要 旨

保存園の精英樹 33 クローンについて、容積密度数、動的ヤング係数および節枝形質を調査した。そのうち 24 クローンについて、胸高部位の生材含水率に関するクローン変異を調べた。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 樹高、胸高直径、容積密度数、年輪幅、動的ヤング係数、節枝径、節枝数、輪生枝数および輪生枝の節枝数に、危険率1%水準でクローン間に有意差が認められた。容積密度数は年輪幅に比べて、分散比が高い値を示した。こ

のことから、容積密度数は環境の影響を受け難く、比較的遺伝的要因の寄与が高いと推察され、育種的な改良効果のある形質であると示唆された。

- (2) 髄から辺縁部に至る5年輪単位で測定された容積密度数では、クローン間に有意差が認められた。高い分散比を示した成熟材に相当する部位と、未成熟材に相当する部位との間には、有意な正の相関が示された。このことから、容積密度数に関しては、樹心部位でクローン間変異の評価ができる可能性の高いことが考えられる。
- (3) 凍結状態で、肉眼で識別された水食い材の含水率は、77～244%の範囲であった。心材の平均含水率が77%、平均の水食い材率が26%であり、両形質の間に有意な正の相関が示された。また、両形質ともにクローン間に有意差も認められ、しかもその変異が大きいと考えられるため、水食い材は、遺伝的要因の寄与のある形質であることが推察される。
- (4) 心材含水率は、胸高直径との間には有意な相関を示さなかったが、元玉丸太の生材密度との間に正の相関を示した。また、心材と辺材の含水率の間には有意な相関は示されず、両形質の間には関連性がないと考えられる。
- (5) 心材では、含水率と容積密度数との間の相関係数は低い値を示したことから、両者は比較的独立した形質である可能性が示唆される。一方、辺材では、含水率と容積密度数の間に有意な負の相関が示され、また、辺材容積密度数は高い分散比を示したことから、辺材含水率からも容積密度数の高い個体を選抜できる可能性が示唆される。
- (6) トドマツ精英樹クローンの中には、陸別102のように容積密度数が高く、水食い材率の低いクローンが存在した。今後、このようなクローンの母樹および花粉親として、その家系に及ぼす遺伝性を明らかにする必要がある。

### 第3節 精英樹クローンの成長および材質の遺伝変異

#### 3.1 はじめに

精英樹クローンで構成された採種園の維持・管理には、採種木となるクローンの特性を明らかにするとともに、その情報に基づいた採種園の改良および採種を進める必要がある。

本節では、精英樹クローンの成長と材質の遺伝変異に関する基礎的な情報を得る目的で、成長調査で8ヵ所の採種園、材質調査で1ヵ所の試験地について、クローン間変異と反復率に関して検討した。

#### 3.2 材料と方法

##### 3.2.1 精英樹クローンの成長調査

成長調査の1ヵ所として、北海道育種場の平坦地に設定されたトドマツ採種園（以下、「育種場採種園」とする。）の精英樹クローンを用いた。育種場採種園では、1962年5月に、それぞれのクローンの個体が単木混交で植栽された。林齢30年生の1991年10月時点で、1クローン当たり2個体以上が存在し、かつ成長過程で主軸の折損等が観察されない67クローン368個体について分析した。当採種園での定期調査によって、植栽木の全個体を対象に、林齢5、10、15、20および30年時点で、樹高、胸高直径およびクローネ径が測定された。なお、枯損木の除去は行われたが、間伐と陽樹冠の枝払いは実施されていない。

また、北海道内の8ヵ所の採種園（雨紛、塩狩、瀬戸瀬、湧別、陸別、築別、発足および育種場採種園：表4-3-2参照）の精英樹クローンの樹高と胸高直径を測定した。採種園の各クローン個体は、単木混交で植栽されている。調査は、林齢20年生あるいは25年生のクローンの個体を対象とした。分析対象は、1クローン当たり1個体以上が

存在し、かつ成長過程で主軸の折損等が観察されない全ての個体とした。1 採種園当たり、20 年生で平均 85 クロウンの 1,412 個体、25 年生で 75 クロウンの 1,327 個体である。育種場採種園以外の採種園では、調査は 1982 年から 1989 年に実施され、調査時期に 20 年生あるいは 25 年生以外のクロンは調査対象外とした。

### 3. 2. 2 精英樹クロンの材質調査

材質調査には、育種場内の平坦地に 1 反復につき 1 クロン 10 個、立木間隔が 1 m の 3 反復で設定された試験地の精英樹クロンを供試した。林齢 25 年生の 1994 年 10 月に、林縁木以外で、成長過程で主軸の折損等が観察されない個体について、当試験地を単木混交植栽として解析するため、1 クロン当たり、1 反復につき 1 個体の計 3 個体、合計で 13 クロンの 39 個体を供試した。調査項目は、胸高直径、胸高部位の容積密度数、年輪幅、水食い材率および動的ヤング係数とした。

伐採した丸太の地上高 1 m から 3 m の部位を材長 2 m に採材し、生材丸太の動的ヤング係数を測定した。測定は、前述した方法（第 4 章 2 節 2.1.3 動的ヤング係数の測定）と同様である。また、胸高部位における容積密度数および水食い材率の測定は、前述した方法（第 4 章 2 節 2 材料と方法）と同様である。なお、胸高部位の平均年輪数は 22 であった。

## 3. 3 結果と考察

### 3. 3. 1 精英樹クロンの成長特性

トドマツの採種園では、樹型誘導を行わない自然型仕立てを採用しているため、単木混交のクロン検定林と同様な情報を得ることができる。また植栽間隔が、造林地と比べて広いため、隣接木との競争や干渉など環境の影響が少ないと考えられる。育種場採種園の 30 年間の成長過程を表 4-3-1 に示した。クロンを要因とした分散分析の結果、それぞれの形質の各林齢において危険率 1 % 水準で有意差が認められた。

表 4-3-1 育種場採種園の 30 年間の成長過程

| 形質  |      | 林 齢 (年) |      |      |      |      |
|-----|------|---------|------|------|------|------|
|     |      | 5       | 10   | 15   | 20   | 30   |
| H   | Avg. | 1.0     | 2.3  | 3.8  | 5.6  | 9.0  |
|     | Std. | 0.3     | 0.7  | 0.7  | 0.7  | 0.8  |
| DBH | Avg. | —       | 2.9  | 6.9  | 11.0 | 19.7 |
|     | Std. |         | 1.6  | 2.0  | 2.4  | 3.5  |
| CD  | Avg. | 0.5     | 1.3  | 2.3  | 3.6  | 5.2  |
|     | Std. | 0.2     | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 1.0  |
| H/D | Avg. | —       | 89.0 | 57.9 | 52.9 | 46.7 |
|     | Std. |         | 44.1 | 10.6 | 9.0  | 8.7  |

H: 樹高(m), DBH: 胸高直径(cm), CD: クロ-ネ径(m),  
H/D: 形状比。  
Avg.: 平均値, Std.: 標準偏差, —: 未測定。

各形質の反復率の年次変化を図4-3-1に示した。反復率はいずれの形質についても、0.50以下を示しており、10年生では0.40～0.43の範囲であった。樹高は、10年生で反復率が0.43と最も高い値を示し、30年生で0.24に減少した。胸高直径は、10年生で0.40と最も高い値を示し、それ以降はゆっくり減少して30年生で0.34を示した。クローネ径は、5年生で0.49と最も高い値を示し、30年生で0.31に減少した。また、樹高と胸高直径（H-D）、胸高直径とクローネ径（D-C）およびクローネ径と樹高（C-H）の形質間の相関係数の年次変化を、図4-3-2に示した。それぞれの組合せにおいて、10年生の相関係数が最も高く、それ以降は減少する傾向を示した。各組合せをみると、胸高直径とクローネ径の関係が最も安定して推移し、30年生においても相関係数が0.85と高い値を示した。

これらの結果から、胸高直径およびクローネ径の反復率は、樹高と比べて、15年生以降で高い値を示し、また、胸高直径とクローネ径の関係の年次変化は、高い相関係数を維持していた。従って、胸高直径はクローネ径と関係があり、樹高よりも再現性がある形質であることが示唆される。

次に、成長形質に関して、採種園間で比較した。林齢20年生時で5ヵ所、そして25年生時で4ヵ所の採種園における胸高直径、樹高、反復率および調査対象としたクローン数と個体数を、表4-3-2に示した。胸高直径と樹高については、育種場採種園の20年生では危険率1%水準でクローン間に有意差が認められた。また他の採種園では、20年生、25年生ともに危険率5%水準でクローン間に有意差が認められた。この結果、全ての採種園で調査した精英樹クローンに、クローン変異のあることが示唆された。また、20年生と25年生の反復率は、樹高で0.06～0.27の範囲、胸高直径で0.15～0.34の範囲を示した。クローン間変異反復率の平均をみると、20年生と25年生でほぼ同じ値を示し、胸高直径で0.23～0.24、樹高で0.17～0.18であった。25年生時におけるアカエゾマツの反復率の平均として、胸高直径で0.52、樹高で0.44の値が得られていることから（飯塚ら、2000a）、トドマツの成長形質の再現

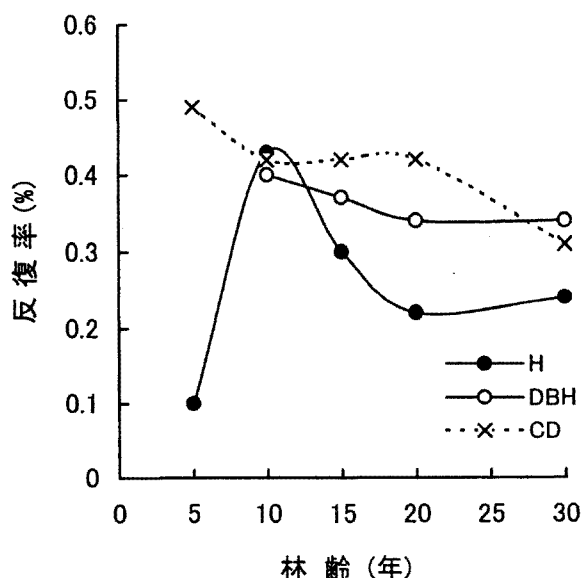


図4-3-1 成長形質の反復率の年次変化

H：樹高、DBH：胸高直径、CD：クローネ径

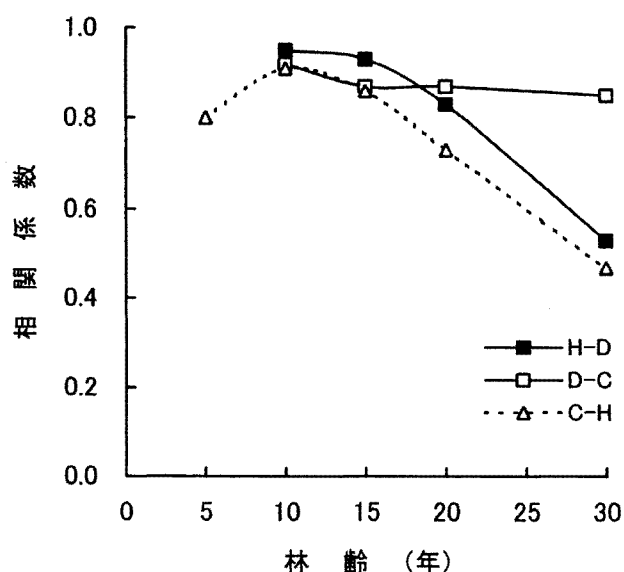


図4-3-2 樹高、胸高直径およびクローネ径における2形質間の相関係数の年次変化

H-D：樹高と胸高直径の関係  
D-C：胸高直径とクローネの関係  
C-H：クローネ径と樹高の関係

性は、アカエゾマツに比べて低いと考えられる。

採種園間の相互関係を検討するため、15クローン以上が共通している2ヵ所の採種園間の樹高に関する相関係数の有意性の判定結果を、表4-3-3に示した。9組合せの中で、3組合せで有意な正の相関 ( $p < 0.05$ ) が得られた。塩狩採種園の20年生時の樹高は、20年生の雨紛、瀬戸瀬および25年生時の雨紛、湧別、陸別、築別採種園との共通クローン間に有意な相関を示さなかった。

以上の結果から、トドマツ精英樹クローンの樹高および胸高直径は、アカエゾマツより反復率が低く、また、遠隔地に植栽された共通クローン間に有意な相関が認められない傾向を示した。この要因のひとつとして、トドマツはアカエゾマツに比べて環境要因の影響を受け易く、クローンと環境の間の交互作用が大きく、また、遺伝的要因の発現を持続的に発揮できない樹種特性がある可能性が推察される。

表 4-3-2 採種園別の20年および25年生の胸高直径と樹高の測定結果および反復率

| 林齢<br>(支)局 営林署 採種園 | 胸高直径 |      | 樹 高  |      | 反 復 率 |      | 調査対象  |       |
|--------------------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
|                    | Avg. | Std. | Avg. | Std. | 胸高直径  | 樹高   | クローン数 | 個体数   |
| 20年生               |      |      |      |      |       |      |       |       |
| 旭 川 旭川 雨 紛         | 10.1 | 1.7  | 5.6  | 0.6  | 0.15  | 0.10 | 58    | 1,083 |
| 士別 塩 狩             | 11.7 | 1.8  | 8.1  | 1.4  | 0.22  | 0.27 | 164   | 3,193 |
| 北 見 遠軽 瀬戸瀬         | 16.1 | 2.4  | 8.7  | 1.0  | 0.26  | 0.20 | 62    | 755   |
| 函 館 岩内 発 足         | 16.0 | 1.6  | 7.7  | 0.5  | 0.19  | 0.06 | 76    | 1,660 |
| 育種場 場 内            | 11.0 | 2.4  | 5.6  | 0.7  | 0.34  | 0.22 | 67    | 368   |
| 平均                 | 13.0 | 2.0  | 7.1  | 0.8  | 0.23  | 0.17 | 85    | 1,412 |
| 25年生               |      |      |      |      |       |      |       |       |
| 旭 川 旭川 雨 紛         | 12.8 | 2.4  | 7.7  | 1.1  | 0.24  | 0.19 | 73    | 2,579 |
| 北 見 遠軽 湧 別         | 20.9 | 2.8  | 11.7 | 1.0  | 0.25  | 0.22 | 58    | 967   |
| 帯 広 陸別 陸 別         | 19.8 | 3.0  | 10.3 | 1.4  | 0.19  | 0.13 | 114   | 929   |
| 北海道 夕張 築 別         | 24.4 | 2.8  | 11.7 | 0.9  | 0.26  | 0.19 | 56    | 833   |
| 平均                 | 19.5 | 2.8  | 10.4 | 1.1  | 0.24  | 0.18 | 75    | 1,327 |

Avg.: 平均値, Std.: 標準偏差。

表 4-3-3 樹高における採種園間の相関

| 採種園      | 塩狩<br>(20) | 湧別<br>(25) | 陸別<br>(25) | 築別<br>(25) |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| 雨 紛 (20) | n.s        |            | *          |            |
| 雨 紛 (25) | n.s        |            |            |            |
| 塩 狩 (20) |            | n.s        | n.s        | n.s        |
| 瀬戸瀬 (20) | n.s        | *          |            |            |
| 発 足 (20) |            |            |            | *          |

( ): 林齢(年)。

\* : 危険率5%水準で有意, n.s: 非有意。

### 3.3.2 精英樹クローンの材質特性

測定した各形質の平均、範囲、クローンを要因とした分散分析の結果および反復率を表4-3-4に示した。分散分析の結果、測定した全ての形質に危険率1%水準でクローン間に有意差が認められた。胸高直径の反復率0.70は、表4-3-2で示した林齢25年生の胸高直径の平均反復率0.24と比べて、異常に高い値を示した。年輪幅では、髄から6～10年輪の樹心部における測定部位の反復率が0.37であるのに対して、16年輪以降の辺縁部で反復率が0.60と高い値を示した。一般に、分散分析法から反復率を算出する場合、個体間競争で生じる分散を分割できないため、クローン間分散の中に競争による分散が加わり、クローン間分散が大きくなる。クローン間個体分散（遺伝子型分散）とクローン間個体分散（遺伝子型分散）＋クローン内個体分散（環境分散）の比率で示される反復率では、個体間競争の影響が、分母よりも分子に対する方が大きいと、高い反復率を示す（遠藤ら、1999）。このことから、当試験地における胸高直径および年輪幅の反復率の高い要因は、林冠の閉鎖が進み、個体間の競争や干渉の影響が生じた結果と考えられる。

材質諸形質の反復率をみると、容積密度数の反復率は、全体で0.58、辺縁部で0.48、樹心部で0.34を示した。また年輪幅では、全体で0.54を示した。採種園に植栽されたトドマツの容積密度数および年輪幅のこれまでに報告された反復率は、片寄ら（1992）の0.40～0.41および0.23、Katayose *et al.*（1992）の0.40および0.39、工藤ら（1993）の0.39～0.48および0.13～0.38、並びに Kadomatsu *et al.*（1994）の0.46および0.36である。本研究における容積密度数の辺縁部および樹心部の反復率は、既報告の反復率と比べて、大きな差は見られないと考えられる。年輪幅についても、個体間の競争の影響が少なくと推察される樹心部の反復率の0.37は、既報告の反復率と比べて大きな差がないと考えられる。しかし、辺縁部で推定した反復率が0.60と高い値を示した要因のひとつは、個体間の競争の影響であると考えられる。従って、容積密度数の反復率は、年輪幅の反復率と比べて、個体間競争の影響を比較的受け難いと推察される。また、アカエゾマツの容積密度数および年輪幅の反復率は、0.71～0.80および0.47～0.56と報告されている（飯塚ら、2000a）ことから、トドマツの容積密度数は、アカエゾマツと比べて再現性が低いと考えられる。水食い材率については、その範囲が1.2～31.6%とクローン間変異が大きいことから、反復率は0.62と高い値を示し、動的ヤング係数の反復率も0.50と比較的高い値を示した。これらの結果は、トドマツにおけるこれらの材質形質が、比較的環境の影響を受け難く、再現性があり、育種的な改良が可能であることを示唆している。

表 4-3-4 各形質の測定結果、分散分析結果および反復率

| 形 質                           | 測 定 結 果 |       |      | 分 散 分 析 結 果 |       |          |         | 分散比      | 反復率  |
|-------------------------------|---------|-------|------|-------------|-------|----------|---------|----------|------|
|                               | Avg.    | Max.  | Min. | 自 由 度       |       | 平 均 平 方  |         |          |      |
|                               |         |       |      | クローン間       | クローン内 | クローン間    | クローン内   |          |      |
| 胸高直径 (cm)                     | 12.5    | 15.8  | 8.0  | 12          | 26    | 12.284   | 1.517   | 8.095 ** | 0.70 |
| 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> )    | 336     | 384   | 314  | 12          | 26    | 1094.333 | 211.718 | 5.169 ** | 0.58 |
| 6-10年輪                        | 334     | 384   | 313  | 12          | 26    | 1062.021 | 420.180 | 2.528 ** | 0.34 |
| 16-                           | 333     | 379   | 301  | 12          | 26    | 1435.436 | 376.103 | 3.817 ** | 0.48 |
| 年輪幅 (mm)                      | 2.5     | 3.1   | 1.6  | 12          | 26    | 0.519    | 0.115   | 4.500 ** | 0.54 |
| 6-10年輪                        | 2.9     | 3.2   | 1.9  | 12          | 26    | 0.380    | 0.138   | 2.758 ** | 0.37 |
| 16-                           | 2.0     | 3.0   | 1.0  | 12          | 26    | 1.113    | 0.199   | 5.594 ** | 0.60 |
| 水食い材率 (%)                     | 18.5    | 31.6  | 1.2  | 12          | 26    | 261.925  | 44.827  | 5.843 ** | 0.62 |
| 動的ヤング係数 (tf/cm <sup>2</sup> ) | 103.1   | 118.4 | 93.9 | 12          | 26    | 154.986  | 38.992  | 3.975 ** | 0.50 |

Avg.: 平均値, Max.: 最大値, Min.: 最小値。

\*\* : 危険率1%水準で有意。

次に、形質間の相関係数を表4-3-5に示した。胸高直径は、容積密度数との間に有意な負の相関 ( $p < 0.01$ ) を示した。容積密度数と動的ヤング係数との間にも、有意な正の相関 ( $p < 0.01$ ) が認められた。このことから、直径成長の良好な個体は、容積密度数が低い傾向を示すことが明らかとなった。また水食い材率は、いずれの形質との間にも有意な相関を示さなかったため、比較的独立した形質であり、再現性の比較的高い形質であることが示唆される。

トドマツの容積密度数については、その反復率がアカエゾマツよりも低いと推察される要因のひとつは、トドマツ材では、環境の影響を受け易いために自然的な生理上の欠点が非常に多く発生しやすい(深沢, 1982) ことが考えられる。今後、林分の個体間の競争や干渉が、木材の性質および反復率に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

表 4-3-5 胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数および水食い材率の形質間の相関係数

| 略号  | 形 質     | DBH        | Bd        | Ed         | Pww   |
|-----|---------|------------|-----------|------------|-------|
| DBH | 胸高直径    | 1.000      |           |            |       |
| Bd  | 容積密度数   | -0.648 **  | 1.000     |            |       |
| Ed  | 動的ヤング係数 | -0.264 n.s | 0.601 **  | 1.000      |       |
| Pww | 水食い材率   | -0.143 n.s | 0.046 n.s | -0.243 n.s | 1.000 |

供試個体数: 39。

\*\* : 危険率1%水準で有意, n.s : 非有意。

### 3.4 要 旨

採種園に植栽された精英樹クローンの成長形質および試験地間の材質形質に関して調査した。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 育種場採種園の樹高および胸高直径の反復率は、10年生で最も高く、樹高で0.43、胸高直径で0.40を示した。また、複数の採種園における20年生と25年生の反復率では、樹高で0.06～0.27の範囲、胸高直径で0.15～0.34の範囲であった。これらの成長形質は、比較的環境の影響を受け易いと推察され、再現性が低いことが示唆される。
- (2) 材質形質の反復率については、容積密度数の辺縁部で0.48、樹心部で0.34、水食い材率で0.62、動的ヤング率で0.50の値を示した。これらの材質形質は、樹高および胸高直径と比べて再現性が高いと示唆される。
- (3) 以上の結果から、採種園の改良において、精英樹クローンの材質形質に基づく除伐は、育種的な改良効果があると考えられる。また水食い材率は、調査した成長と材質形質との間に有意な相関を示さなかったことから、両形質による影響を受け難い、比較的独立した形質であることが示唆された。

## 第4節 実生家系の材質育種

### 4.1 はじめに

モミ属樹木の材質の遺伝性については、ラジアータマツ、テーダマツ、トウヒ属などに比べて、情報量が少ない (Zobel・Jett, 1995)。そのため、トドマツの材質育種を進めるに当たり、由来の明らかな素材の材質変異に関する情報の蓄積を図る必要がある。

造林されたトドマツでは、気象害や病虫害等の被害を受け易いため、優れたトドマツ品種の作出を目的として、本州に天然分布しているウラジロモミ (*Abies homolepis*) とシラベ (*A. veitchii*) が、新たな育種素材として北海道に導入された。導入されたこれらの樹種は、トドマツよりも開葉期が遅く (千葉, 1961; 倉橋ら, 1969, 1974)、また、トドマツとの交雑種においても開葉期が遅くなる。このため晩霜害が回避でき、耐霜性があると考えられ、種間雑種の有効性が示された (倉橋ら, 1973; 柳沢, 1968; 柳沢・服部, 1951)。また飯塚ら (2000d) は、トドマツとウラジロモミの種間雑種の開葉期が、トドマツと比べて2週間程度遅くなることを確認した。しかし、種間雑種による材質については、グイマツとカラマツの交雑種であるグイマツ雑種F<sub>1</sub>の容積密度数が、交雑親の中間的な値になることが知られている (倉橋, 1988; 大島・黒丸, 1995b) が、モミ属の種間雑種の容積密度数に関する報告は見あたらない。

本節では、実生家系における成長と材質の遺伝変異、並びにモミ属の種間雑種による容積密度数の改良の可能性に関する基礎的知見を得ることを目的とした。このため、母樹が明らかな林齢32年の自然交配家系、および母樹と花粉親の両親が明らかな林齢16年の人工交配家系を供試して、成長と材質に関する家系間・内の変異、およびそれぞれの形質間の相互関係について検討した。さらに、容積密度数と年輪幅の狭義の遺伝率を推定するため、人工交配に用いた両親クローンの容積密度数と年輪幅を調べた。

またモミ属の種間雑種については、トドマツを母樹とし、導入されたウラジロモミを花粉親とした種間雑種、トドマツとシラベの種間雑種およびトドマツの種内交配の家系を供試して、容積密度数に関する育種的な改良の可能性を検討した。

### 4.2 材料と方法

#### 4.2.1 自然交配家系

材料の自然交配家系のトドマツは、江別市の野幌地区国有林に、1964年4月に25家系の3反復で植栽され、林齢32年生の1996年1月と2月に間伐率25%で初回間伐された次代検定林から供試した。当次代検定林は、1反復の1家系につき150本の多条植である。その中から、1反復区の任意の20家系を対象に、1家系につき平均7個体の計146個体の間伐木について、地上高3.6mから厚さ5cmの円板を採取した。間伐された任意の個体から供試個体を採取したが、次代検定林は平坦地に設定されているので、それぞれの供試個体では林分内の位置による生育環境の差は少ないと考えられる。

供試した円板の直径を測定後、それから円板の髄を中心とする中心角30度の扇形試験片を切り出した。心材と辺材に分割し、さらに、心材では辺材側から髄に向かって半径方向に5年輪単位で試験体を作製し、それぞれの部位の容積密度数と年輪幅を測定した。円板の平均年輪数は19年輪、心材が13年輪、辺材が6年輪であった。容積密度数は、前述した方法 (第4章第2節2.1.2容積密度数の測定) と同様に測定した。

#### 4.2.2 人工交配家系

材料の人工交配家系のトドマツは、北海道育種場の試験地に、1家系につき22個体の1列2条植えで1980年11月に植栽され、林齢16年生の1996年10月に伐採された個体から、生存率の高い15家系を供試した。主幹折れが観察されなかった個体を対象に、1家系につき6個体の計90個体を採取した。植栽列全体から供試個体を採取したが、試験地は平坦地に設定されているので、それぞれの供試個体では、林分内の位置による生育環境の差が小さいと考えられる。

樹高と胸高直径を測定後、枝払いをした供試個体について、地上高1 mから3 m間の材長2 mに採材し、生材丸太の動的ヤング係数を測定した。動的ヤング係数を測定した丸太の節枝形質として、節枝径、節枝数および輪生枝の節枝数を測定した。節枝数は、材長1 m当たりの節数とし、輪生枝の節枝数は、全節枝数に対する全輪生枝数の比として表した。節枝形質の測定は主幹との接線径を節径として行った。供試個体では枝打ちが行われておらず、供試部位で枝の枯上がりが見られなかったため、測定した節枝は全て生節枝であった。

次に、供試個体の胸高部位から厚さ5 cmの円板を採取し、円板の髄を中心とする中心角30度の扇形試験片を切り出し、容積密度数と年輪幅を測定した。平均年輪数は11年輪であった。材質諸形質については、容積密度数、動的ヤング係数および節枝形質を、前述した方法（第4章第2節2.1 材質諸形質の調査）と同様に測定した。

人工交配に用いた精英樹クローンとその交配家系の関係を検討するため、母樹および花粉親に供試した8クローンについて調査した。これらのクローンは、北海道育種場の場内採種園および育種素材保存園に植栽されている、精英樹および育種素材である。母樹は、名寄103 (S1)、振内102 (S2)、野幌1 (S3) の3クローン、そして花粉親は、釧路1 (S4)、北林育101 (S5)、北見6 (S6)、摩周21 (S7)、網走101 (S8)、野幌1 (S3) の6クローンである（表4-4-5を参照）。それぞれのクローンについて、交配に用いた1個体を含む3個体、計8クローン24個体の胸高部位から、内径10mmの成長錘により、髄から樹皮に至る試験体を採取した。試験体の採取は、両親クローンが林齢32～36年生の1997年5月に行い、胸高直径の平均値の範囲は16～26cmであった。採取した試験体の中に、圧縮あて材が観察された個体があったため、圧縮あて材が観察されなかった辺縁部の髄から21～25年輪の5年輪を対象に、容積密度数と年輪幅を測定した。容積密度数は、前述した方法（第4章第2節2.1.2 容積密度数の測定）と同様に測定した。

#### 4.2.3 トドマツとウラジロモミおよびシラベの種間雑種

材料である種間雑種のトドマツ×ウラジロモミ（以下「S×H」とする）およびトドマツ×シラベ（以下「S×V」とする）、種内交配のトドマツ×トドマツ（以下「S×S」とする）のそれぞれの家系は、北海道育種場の試験地に、2反復を基本として1988年5月に植栽された。林齢11年生の1998年10月に、伐採率50%の初回間伐が行われた。その中から、自家受粉家系および生育不良家系を除き、S×HとS×Vは各6個体、そしてS×Sでは156個体の胸高部位から厚さ5 cmの円板を採取した。供試個体数は1家系につき、3～6個体（S×Sでは1母樹家系当たり、14～30個体）とした。試験地は平坦地に設定されているので、それぞれの供試個体では、林分内の位置による生育環境の差が小さいと考えられる。

S×HおよびS×Vの交雑種は、それぞれ2母樹家系であった。母樹のトドマツ精英樹2クローンは苦小牧4と俄虫106で、花粉親は、北海道育種場の遺伝子保存園に植栽されたウラジロモミとシラベ（両樹種ともに長野県諏訪産）であり、トドマツの家系では、7母樹家系であった（表4-4-8を参照）。母樹は、苦小牧4、俄虫106、俄虫

104, 余市4, 岩内106, 白老9および白老8の精英樹7クローン, 花粉親は, 俄虫106, 俄虫104, 岩内106, 白老9および白老8の精英樹5クローンであった。なお, これらのトドマツ精英樹は, いずれも北海道南部地域から選抜されたものである(河野・栄花, 1985)。

一方, 北海道育種場の平坦な遺伝資源保存園に植栽されているウラジロモミ, シラベおよびトドマツの健全に生育した成木について, それぞれ3個体の胸高部位から内径10mmの成長錐により, 髄から樹皮に至る試験体采取了。ウラジロモミとシラベは, 当場内の花粉が採取された長野県諏訪産の植栽区, トドマツは同じく当場内の倶知安産の植栽区から採取した。試験体の採取は, 1999年5月に行った。供試木の林齢は, ウラジロモミ39年生, シラベ33年生およびトドマツでは34年生であった。胸高直径の平均は各樹種ともに22cm, その範囲は20~24cmであった。樹高の範囲は10~12mであった。

交雑家系の材質調査に関しては, 供試円板の直径を測定後, 髄を頂点とした扇形試験体(中心角30度)を切り出し, 容積密度数と年輪幅を測定した。供試個体の平均年輪数は7年輪であった。一方, ウラジロモミ, シラベおよびトドマツの成木では, 樹皮に近い部位を除いた髄から25年輪間について, 5年輪単位に試験片を作製し, 容積密度数と年輪幅を測定した。容積密度数は, 前述した方法(第4章第2節2.1.2容積密度数の測定)と同様に測定した。なおウラジロモミでは, 樹皮に近い5年輪程度の年輪幅が1mm以下と急激に狭くなっている個体が存在したため, 3樹種に共通した髄から25年輪の部位を測定範囲とした。なお, 圧縮あて材が観察された部位を測定から除外した。

次に, 種間雑種では4家系の各3個体の計12個体, トドマツの種内交配S×Sでは, 種間雑種と母樹が共通である苦小牧4と俄虫106の2母樹家系の各3個体の計6個体, 並びにウラジロモミ, シラベおよびトドマツの成木を対象に, 細胞形態を観察するためプレパラートを作製した。交雑家系については, 髄から6年輪目の部位を, 成木の3樹種では, 11~14年輪の部位を対象に, スライディングマイクロームを用いて厚さ20 $\mu$ mの木口切片を作製後, 常法によりプレパラートを作製し, 光学顕微鏡で写真撮影を行って細胞形態を観察した。早材と晩材の境界は, Morkの定義{半径方向内径(ルーメン幅)/壁厚=2}に基づいて決定した。

#### 4.3 結果と考察

##### 4.3.1 自然交配家系

自然交配20家系の地上高3.6m部位の直径, 樹心部と辺縁部の容積密度数と年輪幅における家系の平均値, 最大値および最小値, 並びに各形質についての家系を要因とした分散分析の結果を表4-4-1に示した。樹心部は髄に近い5年輪の測定部位とし, 辺縁部は辺材の平均6年輪部位である。樹心部は未成熟材に相当し, 辺縁部は, 14~19年輪の範囲の測定部位であるため, 未成熟材から成熟材に移行する部位に相当すると考えられる(塩倉, 1982)。

供試した家系における最小値と最大値の範囲は, 直径が14.5~19.3cm, 容積密度数では樹心部が290~348kg/m<sup>3</sup>, 辺縁部が301~338kg/m<sup>3</sup>, 年輪幅では樹心部が4.7~6.1mm, 辺縁部が2.1~3.9mmであった。辺縁部は樹心部と比べて, 容積密度数が平均で11kg/m<sup>3</sup>の高い値を示したが, 年輪幅は平均で5.3mmから2.9mmに減少した。分散分析の結果(表4-4-1), 直径は危険率5%水準で家系間に有意差が, 容積密度数は樹心部, 辺縁部ともに危険率1%水準で家系間に有意差が認められた。年輪幅では, 辺縁部で危険率1%水準で家系間に有意差が認められたが, 樹心部では有意差は認められなかった。

年輪幅と容積密度数の関係を図4-4-1に示した。容積密度数と年輪幅との間の相関係数については, 樹心部で-0.11, 辺縁部で-0.19を示し, それぞれの部位における相関係数は低い値を示した。容積密度数および年輪幅に関

する樹心部と辺縁部の関係を、図4-4-2に示した。容積密度数では、両者の間に有意な正の相関 ( $r = 0.653^{**}$ ) が見られたが、年輪幅では有意な関係は認められなかった。

辺縁部の容積密度数について、容積密度数の高い家系の順 (1～20家系) に並べて図4-4-3に示した。針葉樹構造材としては、材のめり込み、釘の保持力、ほぞのような接合部の耐力などを考慮すれば、容積密度数は平均値  $320\text{kg/m}^3$ 、最低値で  $300\text{kg/m}^3$  以上が好ましいと言われている (宮島, 1985)。本研究で調査したトドマツでは、容積密度数が  $300\text{kg/m}^3$  以下の個体が存在したが、全家系で平均容積密度数は  $300\text{kg/m}^3$  以上を示した。構造材として利用する場合、これらの値は最低限度に近い容積密度数である。また辺縁部の容積密度数は、最小有意差 ( $p < 0.05$ ) (奥野, 1978) により、20家系が4区分にグループ化され、最上位グループ (5家系) の平均は  $336\text{kg/m}^3$ 、最下位グループ

表4-4-1 自然交配家系の材質の測定結果および分散分析結果

| 形 質                        | 測 定 結 果 |      |      | 分 散 分 析 結 果 |       |         |         |           |
|----------------------------|---------|------|------|-------------|-------|---------|---------|-----------|
|                            | Avg.    | Max. | Min. | 自 由 度       |       | 平 均 平 方 |         | 分散比       |
|                            |         |      |      | クローン間       | クローン内 | クローン間   | クローン内   |           |
| 直 径 (cm)                   | 16.5    | 19.3 | 14.5 | 19          | 127   | 4.261   | 2.510   | 1.698 *   |
| 辺縁部                        |         |      |      |             |       |         |         |           |
| 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> ) | 320     | 338  | 301  | 19          | 127   | 822.009 | 316.501 | 2.597 **  |
| 年 輪 幅 (mm)                 | 2.9     | 3.9  | 2.1  | 19          | 127   | 0.864   | 0.389   | 2.221 **  |
| 樹心部                        |         |      |      |             |       |         |         |           |
| 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> ) | 309     | 348  | 290  | 19          | 127   | 975.627 | 358.468 | 2.722 **  |
| 年 輪 幅 (mm)                 | 5.3     | 6.1  | 4.7  | 19          | 127   | 0.739   | 0.464   | 1.593 n.s |

直径: 地上高3.6m部位の直径, Avg.: 平均値, Max.: 最大値, Min.: 最小値。

\*\* : 危険率1%水準で有意, \* : 危険率5%水準で有意。

辺縁部: 髄から14-19年輪部位, 樹心部: 髄に近い5年輪部位。

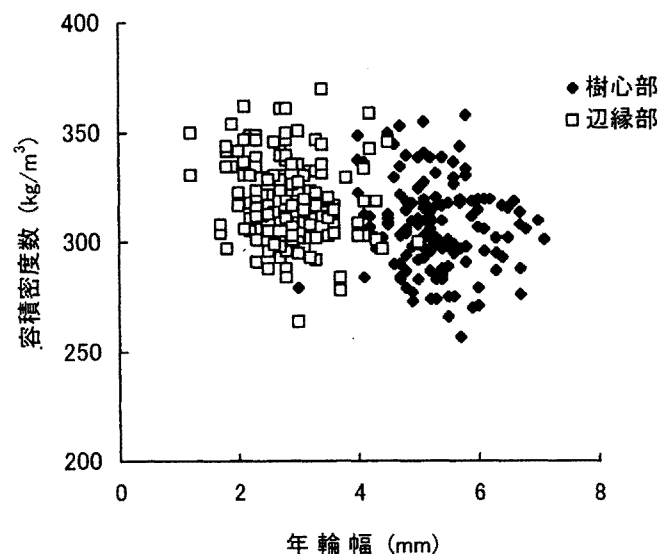


図4-4-1 年輪幅と容積密度数の関係

樹心部および辺縁部は、各146個体である。

樹心部:  $r = -0.11$ , 辺縁部:  $r = -0.19$ 。

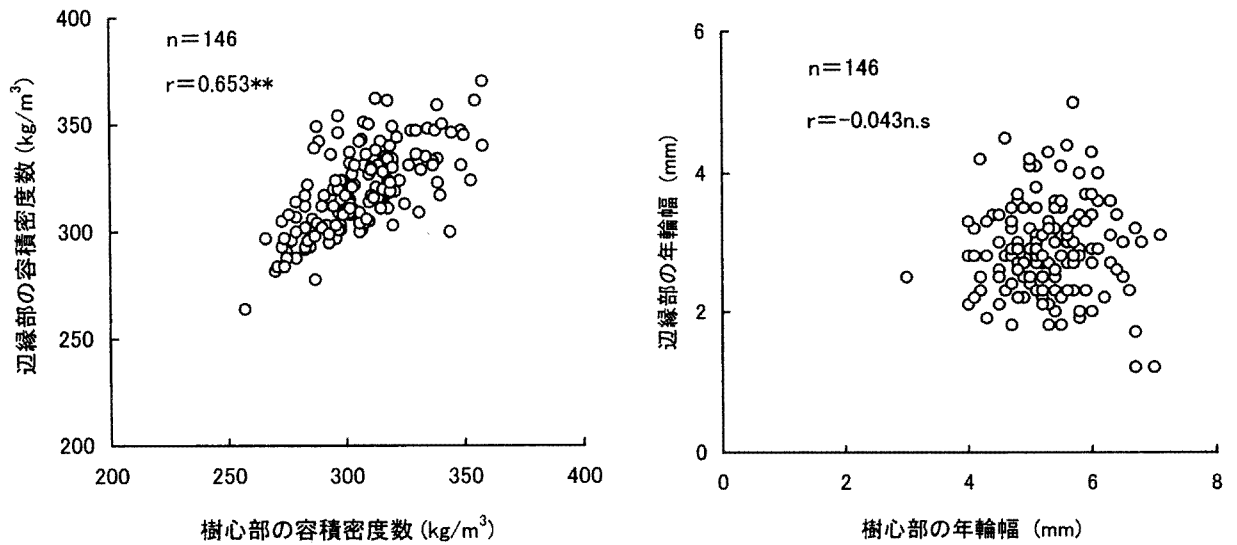


図4-4-2 容積密度数および年輪幅に関する樹心部と辺縁部の関係

n：供試個体数，\*\*：危険率1%水準で有意，n.s：非有意。

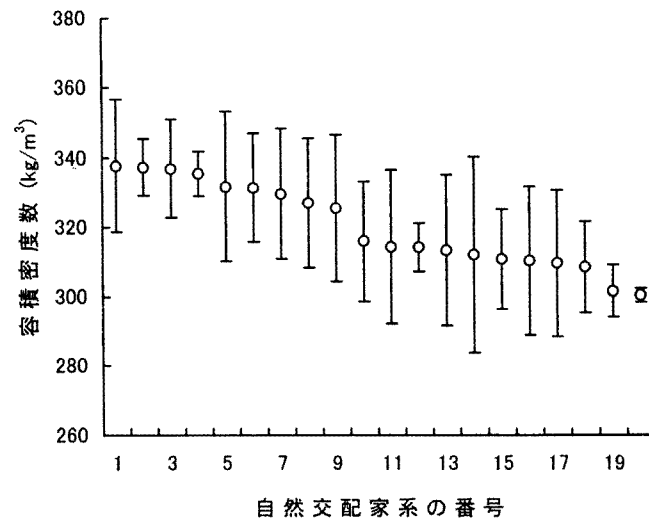


図4-4-3 自然交配20家系の容積密度数

垂直線の範囲：標準偏差

自然交配家系の番号は、容積密度数の高い順番を示す。

(3家系)の平均は $303\text{kg/m}^3$ を示した。両グループの平均容積密度数の差は、 $33\text{kg/m}^3$ であった。このことから、容積密度数の高い子供家系を生産する母樹を選抜し、その家系を植林すれば、低密度材の出現は軽減できる可能性があると考えられる。

以上の結果から、トドマツの自然交配家系において、容積密度数は年輪幅と比べて遺伝性が高い形質と考えられ、また樹心部と辺縁部との間に有意な相関が認められた。従って、容積密度数は、比較的早期に家系間差異を評価できる可能性があることが示唆された。また、トドマツ材の利用価値を高めるためには、容積密度数の高い子供家系を生産する母樹を明らかにすることが重要である。

#### 4.3.2 人工交配家系

供試した人工交配15家系の各形質の平均値を表4-4-2に示した。供試個体の平均年輪数は11年輪であるため、未成熟材に相当すると考えられる。それぞれの形質の範囲を見ると、樹高は $5.4\sim 6.9\text{m}$ 、胸高直径は $8.3\sim 11.9\text{m}$ 、容積密度数は $304\sim 348\text{kg/m}^3$ 、年輪幅は $3.6\sim 5.0\text{mm}$ 、動的ヤング係数は $76.2\sim 102.6\text{tf/cm}^2$ 、節枝径は $1.3\sim 1.9\text{mm}$ 、節枝数は $10.9\sim 15.5$ 本、輪生枝の節枝数は $3.8\sim 5.0$ 本であった。家系を要因とした分散分析の結果を表4-4-3に示した。調査した全ての形質で家系間に有意差が認められた。材質形質である容積密度数および動的ヤング係数の分散比は4.0以上で、成長形質の樹高、胸高直径、年輪幅および節枝形質の分散比は3.2以下を示した。形質の分散比が高いことは、形質の家系間分散に比べて家系内分散が小さいこと示すため、その形質の遺伝的要因の寄与が高いと考えられる。従って、材質形質は成長と節枝形質と比べて、遺伝性が高いことが示唆される。また輪生枝数は、雪害抵抗性と関係のある形質であり(畠山, 1987)、モミ属交雑家系の輪生枝数を調査した報告(高倉・飯塚, 2000)で指摘されているように、トドマツの輪生枝の節数には家系間に有意差が認められ、育種的な改良の余地がある形質と推察される。

全ての供試個体における形質間の相互関係を検討するため、形質間に有意な相関を示した相関係数を表4-4-4に示した。胸高直径は、容積密度数との間に有意な負の相関を示し、節枝径との間に有意な正の相関を示した。このことから、直径成長の良い個体は、容積密度数が低く、節枝径が大きい傾向を示すことが分かる。容積密度数は、動的ヤング係数との間に有意な正の相関を示したため、低密度材では強度材質が低いことが示唆される。動的ヤング係数は、節枝諸形質との間に有意な相関を示さなかった。このことから、若齢期における生材の動的ヤング係数は、容積密度数の影響を受ける傾向を示したが、節枝諸形質の影響は少ないことが示唆される。

次に、容積密度数および年輪幅の親子相関を検討するために、人工交配に用いた両親の8クローンについて、髓から21-25年輪の5年輪部位における容積密度数および年輪幅の測定結果を、表4-4-5に示した。クローンの平均値の範囲をみると、容積密度数は $335\sim 375\text{kg/m}^3$ 、年輪幅は $2.1\sim 3.9\text{mm}$ であった。分散分析の結果、容積密度数、年輪幅ともに、クローン間に有意差が認められた(表4-4-6)。このことから、人工交配に用いた両親のクローンでは、容積密度数および年輪幅にクローン間変異のあることが示唆された。

また、母樹と花粉親クローンの測定値から求めた平均値を、その人工交配家系の両親(中間親)の値とし、人工交配家系(子供家系)の測定値との相関を検討した。容積密度数および年輪幅における親子関係を図4-4-4に示した。容積密度数における両親と子供家系の関係は、相関係数0.583の有意な相関( $p < 0.05$ )を示した。回帰直線から大きくはずれた親子の組合せが存在したが、本研究で供試した子供家系は若齢で未成熟材であることが、その結果に影響したと考えられる。親子回帰から推定される遺伝率は、両親クローンの平均値に対する子供家系の平均値の回

表4-4-2 人工交配15家系の各形質の測定結果

| 樹 高 (m) |     |     |     |     |     |     |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ♂       | S4  | S5  | S6  | S7  | S8  | S3  |
| ♀       |     |     |     |     |     |     |
| S1      | 5.5 | 6.7 | 5.6 | 5.5 | 6.2 | 6.8 |
| S2      | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.9 | 6.3 |
| S3      | 5.4 | 5.6 | 5.4 | —   | —   | —   |

| 胸高直径 (cm) |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
|           | S4   | S5   | S6   | S7   | S8   | S3   |
| S1        | 9.6  | 11.4 | 9.8  | 9.8  | 9.4  | 11.7 |
| S2        | 11.9 | 8.3  | 10.7 | 10.9 | 10.9 | 9.7  |
| S3        | 8.8  | 9.1  | 10.0 | —    | —    | —    |

| 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |     |     |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                            | S4  | S5  | S6  | S7  | S8  | S3  |
| S1                         | 348 | 332 | 337 | 326 | 307 | 321 |
| S2                         | 315 | 317 | 304 | 307 | 306 | 308 |
| S3                         | 318 | 325 | 307 | —   | —   | —   |

| 年輪幅 (mm) |     |     |     |     |     |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          | S4  | S5  | S6  | S7  | S8  | S3  |
| S1       | 3.8 | 4.2 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.4 |
| S2       | 5.0 | 4.0 | 4.2 | 4.0 | 4.6 | 4.3 |
| S3       | 3.7 | 3.6 | 4.1 | —   | —   | —   |

| 動的ヤング係数 (tf/cm <sup>2</sup> ) |       |      |       |      |      |      |
|-------------------------------|-------|------|-------|------|------|------|
|                               | S4    | S5   | S6    | S7   | S8   | S3   |
| S1                            | 102.6 | 97.6 | 102.0 | 89.7 | 85.5 | 93.4 |
| S2                            | 83.2  | 89.1 | 90.4  | 87.2 | 85.2 | 79.4 |
| S3                            | 88.4  | 86.5 | 76.2  | —    | —    | —    |

| 節枝径 (cm) |     |     |     |     |     |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          | S4  | S5  | S6  | S7  | S8  | S3  |
| S1       | 1.5 | 1.6 | 1.5 | 1.3 | 1.4 | 1.5 |
| S2       | 1.9 | 1.3 | 1.6 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| S3       | 1.5 | 1.4 | 1.6 | —   | —   | —   |

| 節枝数 (本) |      |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|------|
|         | S4   | S5   | S6   | S7   | S8   | S3   |
| S1      | 13.5 | 12.2 | 15.5 | 14.1 | 11.8 | 13.6 |
| S2      | 12.0 | 11.5 | 13.2 | 14.3 | 10.9 | 12.2 |
| S3      | 11.8 | 14.8 | 13.4 | —    | —    | —    |

| 輪生枝の節枝数 (本) |     |     |     |     |     |     |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|             | S4  | S5  | S6  | S7  | S8  | S3  |
| S1          | 4.2 | 4.9 | 5.0 | 4.6 | 4.1 | 4.9 |
| S2          | 3.8 | 4.5 | 4.4 | 5.0 | 4.6 | 4.4 |
| S3          | 4.1 | 3.8 | 4.0 | —   | —   | —   |

S1～S8: 交配クローンのコード番号(表4-4-5 参照),  
 S1～S3: 母樹(♀), S4～S8およびS3: 花粉親(♂)。  
 —: 未調査。

表 4-4-3 人工交配家系における家系を要因とした分散分析結果

| 形 質     | 自 由 度 |       | 平 均 平 方  |         | 分散比      |
|---------|-------|-------|----------|---------|----------|
|         | クローン間 | クローン内 | クローン間    | クローン内   |          |
| 樹 高     | 14    | 75    | 1.881    | 0.690   | 2.726 ** |
| 胸高直径    | 14    | 75    | 7.088    | 2.246   | 3.156 ** |
| 容積密度数   | 14    | 75    | 1029.719 | 248.378 | 4.146 ** |
| 年輪幅     | 14    | 75    | 0.759    | 0.377   | 2.013 *  |
| 動的ヤング係数 | 14    | 75    | 324.592  | 66.837  | 4.856 ** |
| 節枝径     | 14    | 75    | 0.111    | 0.046   | 2.413 ** |
| 節枝数     | 14    | 75    | 10.960   | 4.650   | 2.357 ** |
| 輪生枝の節枝数 | 14    | 75    | 1.026    | 0.342   | 3.000 ** |

\*\* : 危険率1%水準で有意, \* : 危険率5%水準で有意。

表 4-4-4 人工交配家系の成長, 材質および節枝形質の形質間の相関係数

| 略号   | 形 質     | H        | DBH      | Bd        | Arw       | Ed    | Dk       | Nk    | Nkwb  |
|------|---------|----------|----------|-----------|-----------|-------|----------|-------|-------|
| H    | 樹 高     | 1.000    |          |           |           |       |          |       |       |
| DBH  | 胸高直径    | 0.529 ** | 1.000    |           |           |       |          |       |       |
| Bd   | 容積密度数   | -0.247 * | -0.233 * | 1.000     |           |       |          |       |       |
| Arw  | 年輪幅     | 0.376 ** | 0.661 ** | -0.494 ** | 1.000     |       |          |       |       |
| Ed   | 動的ヤング係数 |          |          | 0.561 **  |           | 1.000 |          |       |       |
| Dk   | 節枝径     | 0.292 ** | 0.643 ** |           | 0.514 **  |       | 1.000    |       |       |
| Nk   | 節枝数     | -0.214 * |          |           | -0.280 ** |       | -0.230 * | 1.000 |       |
| Nkwb | 輪生枝の節枝数 |          | 0.270 *  |           |           |       |          |       | 1.000 |

供試個体数: 90。

\*\* : 危険率1%水準で有意, \* : 危険率5%水準で有意。

表 4-4-5 交配クロンの容積密度数と年輪幅の測定結果

| クローン名   | コード | 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> ) |         | 年輪幅 (mm) |         |
|---------|-----|----------------------------|---------|----------|---------|
|         |     | 平均                         | 範 囲     | 平均       | 範 囲     |
| 名 寄 103 | S1  | 367                        | 363~372 | 3.3      | 3.1~3.4 |
| 振 内 102 | S2  | 340                        | 327~349 | 3.2      | 2.6~3.7 |
| 野 幌 1   | S3  | 339                        | 323~359 | 3.8      | 3.4~4.3 |
| 釧 路 1   | S4  | 375                        | 374~377 | 2.1      | 1.9~2.2 |
| 北林育 101 | S5  | 347                        | 329~363 | 3.9      | 3.4~4.3 |
| 北 見 6   | S6  | 347                        | 339~357 | 3.5      | 3.2~3.9 |
| 摩 周 21  | S7  | 335                        | 320~354 | 2.9      | 2.6~3.1 |
| 網 走 101 | S8  | 362                        | 354~369 | 2.7      | 2.5~2.8 |

測定部位: 髓から21~25年輪の5年輪部位。

表 4-4-6 交配クロンの容積密度数および年輪幅における分散分析結果

| 形 質   | 自 由 度 |      | 平 均 平 方 |         | 分散比      |
|-------|-------|------|---------|---------|----------|
|       | クロン間  | クロン内 | クロン間    | クロン内    |          |
| 容積密度数 | 7     | 16   | 649.946 | 154.625 | 4.203 ** |
| 年 輪 幅 | 7     | 16   | 1.101   | 0.124   | 8.879 ** |

\*\*：危険率1%水準で有意。

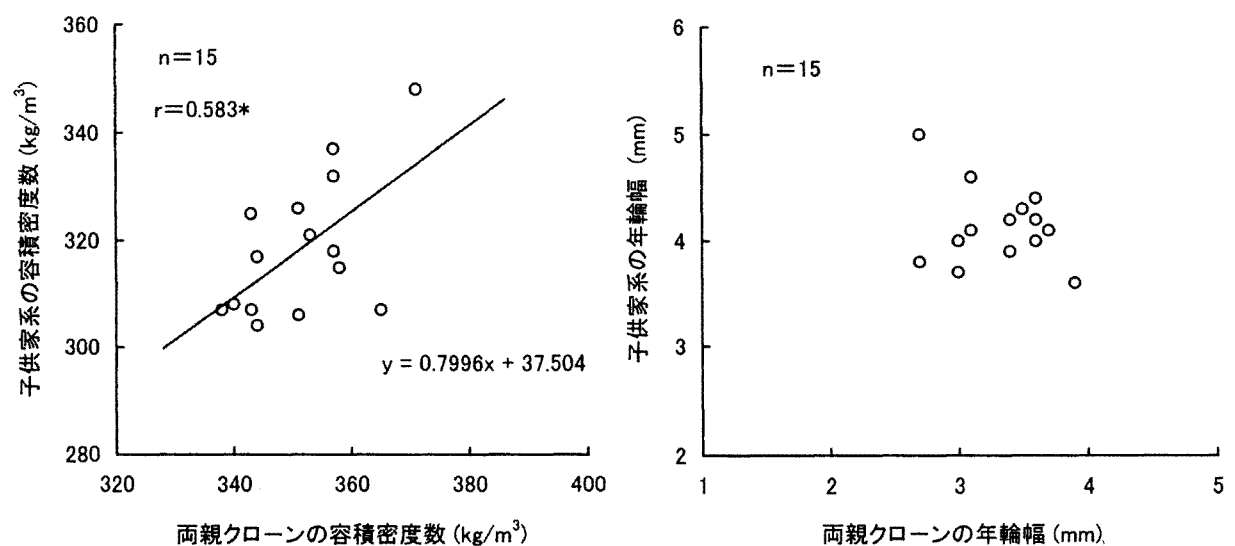


図 4-4-4 容積密度数および年輪幅における両親と子供家系の関係

n：供試個体数，\*：危険率5%水準で有意。

帰係数として得ることができる（松尾，1978）。両親クロンの平均値の分散  $91\text{kg/m}^3$  と子供家系の分散  $171\text{kg/m}^3$  に差異があるため，中間親と子供家系の偏差平方和に基づいて算出される補正係数を乗じて標準化（Wright, 1976）し，遺伝率を推定した。針葉樹における容積密度数の狭義の遺伝率は一般的に高く，0.4～0.7と言われている（Zoble・van Buijtenen, 1989）。これは未成熟材，成熟材に共通しており，一般に低密度材の樹種は，高密度材樹種よりも，わずかに小さい値を示す傾向が見られる。本研究において，推定した狭義の遺伝率は，0.58と比較的高い値を示したことから，容積密度数は遺伝する形質であることが示唆された。今後，容積密度数と関係があると言われる細胞壁厚，晩材率，仮道管長の遺伝性について，明らかにする必要がある。

一方，年輪幅における両親と子供家系の関係は，有意な相関を示さなかった（図4-4-4）。前述したように（第4 第4節2.1自然交配家系），容積密度数は樹心部と辺縁部との間に有意な正の相関を示したが，年輪幅では有意な相関が認められなかった。年輪幅は，林冠の閉鎖に伴って隣接木との競争や干渉のため直径成長が抑制されること，また林齢が増すとともに，成長初期と異なる直径成長を示す可能性がある」と推察される。このことにより，両親クロンと子供家系との間に有意な相関を示さなかったものと考えられる。

一般的にトドマツの造林は、精英樹クローンで構成された採種園において、自然受粉により生産される実生苗で行われる。このため母樹は特定されるが、花粉親は不特定であるため、母樹の特性が重要になる。そこで、花粉親6クローンが共通したS1母樹家系とS2母樹家系の容積密度数について、 $t$ 検定した結果を表4-4-7に示し、頻度分布を図4-4-5に示した。両家系ともに36個体である。S1母樹家系の平均容積密度数は $328\text{kg/m}^3$ 、S2母樹家系は $309\text{kg/m}^3$ であり、両者の間に危険率1%水準で有意差が認められた。S1母樹家系の個体の75%が容積密度数 $320\text{kg/m}^3$ 以上を示したが、S2母樹家系の個体の75%が容積密度数 $320\text{kg/m}^3$ 未満を示した。また、S2母樹クローンの容積密度数は、S1が $367\text{kg/m}^3$ 、S2が $340\text{kg/m}^3$ （表4-4-5）であったため、子供家系と同様に、S1がS2より高い値を示した。

以上の結果から、容積密度数は両親の特性が遺伝すると考えられ、年輪幅と比べて、高い育種改良の効果が期待できる形質であることが示唆された。従って、容積密度数の高い親同士との交配から、容積密度数の高い次代（子供家系）の作出が期待される。また次代の材質形質は、母樹と花粉親に影響を受けることが考えられるので、採種園においては、採種母樹の周辺に植栽されている花粉親になる可能性が高い精英樹クローンの特性が問題になる。採種園の改良に当たり、容積密度数の低い精英樹クローンを除去し、さらに容積密度数の高い母樹から採種することで、低密度材になるトドマツの種子の生産を少なくすることが期待される。従って、精英樹クローンの容積密度数を明らかにして、その結果に基づいた採種園管理が必要になる。

表 4-4-7 S1 と S2 母樹家系の容積密度数 ( $\text{kg/m}^3$ ) における  $t$  検定結果

| S1母樹家系 |      | S2母樹家系 |      | $t$ 検定の結果 |          |
|--------|------|--------|------|-----------|----------|
| 平均     | 標準偏差 | 平均     | 標準偏差 | 自由度       | $t$ 値    |
| 328    | 17   | 309    | 16   | 70        | 4.695 ** |

母樹家系数:各36個体。  
 \*\*:危険率1%水準で有意。

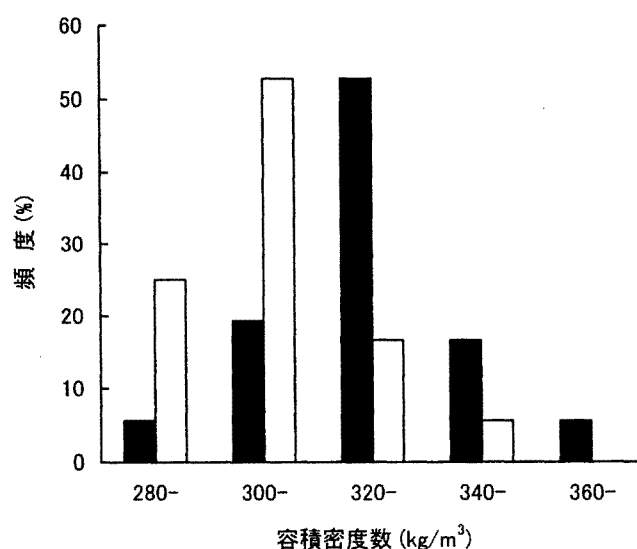


図 4-4-5 S1 と S2 母樹家系の容積密度数の頻度分布

■ S1母樹家系 □ S2母樹家系

## 4.3.3 トドマツとウラジロミおよびシラベの種間雑種

供試した種間交雑2種 (S×HとS×V) およびトドマツ家系 (S×S) について、容積密度数、胸高直径および樹高の調査結果を表4-4-8に示した。供試個体は平均年輪数が7年輪であったため、すべて未成熟材と考えられる。容積密度数の範囲は、S×Hは312～350kg/m<sup>3</sup>、S×Vは282～323kg/m<sup>3</sup>およびS×Sでは261～333kg/m<sup>3</sup>であった。容積密度数について、樹種を要因とした分散分析の結果を表4-4-9に示した。樹種間の容積密度数に有意差が示された (p<0.01)。一方、S×Sの胸高直径の範囲は、5.2～11.3cm、樹高の範囲は3.8～7.2mであった。このように、交雑2種の胸高直径と樹高の範囲は、S×Sの胸高直径と樹高の範囲に含まれる結果を示した。

表4-4-8 種間雑種とトドマツ家系の容積密度数、胸高直径および樹高の測定結果

| 区 分    | 母樹名   | 花粉親   | 略号  | 個体数 | 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |      | 胸高直径(cm) |      |      | 樹 高 (m) |      |      |
|--------|-------|-------|-----|-----|----------------------------|------|------|----------|------|------|---------|------|------|
|        |       |       |     |     | Avg.                       | Max. | Min. | Avg.     | Max. | Min. | Avg.    | Max. | Min. |
| 種間雑種   | 苦小牧4  | ウラジロミ | S×H | 3   | 325                        | 349  | 312  | 10.2     | 10.6 | 10.0 | 5.5     | 5.8  | 5.1  |
|        | 俄虫106 | ウラジロミ | S×H | 3   | 346                        | 350  | 343  | 7.2      | 7.6  | 6.7  | 4.7     | 5.2  | 3.9  |
|        | 苦小牧4  | シラベ   | S×V | 3   | 311                        | 321  | 303  | 8.0      | 9.8  | 8.0  | 5.5     | 6.4  | 4.8  |
|        | 俄虫106 | シラベ   | S×V | 3   | 306                        | 323  | 282  | 6.3      | 7.0  | 5.8  | 4.7     | 4.9  | 4.4  |
| トドマツ家系 |       | 花粉親数  |     |     |                            |      |      |          |      |      |         |      |      |
|        | 苦小牧4  | 4     | S×S | 20  | 302                        | 333  | 268  | 8.1      | 10.5 | 6.4  | 5.0     | 6.4  | 3.9  |
|        | 俄虫106 | 3     | S×S | 14  | 285                        | 317  | 261  | 8.5      | 11.0 | 6.4  | 5.7     | 6.4  | 4.7  |
|        | 俄虫104 | 4     | S×S | 22  | 292                        | 327  | 268  | 8.6      | 11.3 | 6.4  | 5.4     | 7.2  | 4.4  |
|        | 余市4   | 5     | S×S | 30  | 299                        | 332  | 264  | 7.2      | 10.6 | 6.4  | 4.8     | 5.7  | 4.1  |
|        | 岩内106 | 4     | S×S | 23  | 296                        | 308  | 270  | 8.9      | 11.0 | 7.2  | 5.2     | 6.2  | 3.9  |
|        | 白老9   | 4     | S×S | 24  | 286                        | 301  | 265  | 8.6      | 10.8 | 6.8  | 5.2     | 6.3  | 3.8  |
|        | 白老8   | 4     | S×S | 23  | 293                        | 324  | 275  | 8.6      | 10.5 | 5.2  | 5.3     | 5.9  | 3.8  |

Avg.: 平均値, Max.: 最大値, Min.: 最小値。

表4-4-9 容積密度数について交雑組合せを要因とした分散分析結果

| 自 由 度 |     | 平 均 平 方  |         | 分散比       |
|-------|-----|----------|---------|-----------|
| 樹種間   | 樹種内 | 樹種間      | 樹種内     |           |
| 2     | 165 | 5395.910 | 282.304 | 19.114 ** |

樹種(交雑組合せ): S×H, S×V, S×S。

\*\* : 危険率1%水準で有意。

トドマツ精英樹の苦小牧4と俄虫106を母樹とした交雑種家系と、トドマツ家系の変異を検討するために、S×H、S×VおよびS×Sの6母樹家系46個体の容積密度数について、母樹家系を要因とした分散分析を行った結果、母樹家系間に有意差が認められた (p<0.01) (表4-4-10)。さらにS×H、S×VおよびS×Sの46個体の胸高直径と容積密度数の関係を図4-4-6に示した。S×Hの平均容積密度数は334kg/m<sup>3</sup>、S×Vは309kg/m<sup>3</sup>およびS×Sでは294kg/m<sup>3</sup>であった。平均胸高直径は、それぞれ8.7cm、7.2cmおよび8.3cmであった。表4-4-8から、容積密度数の

最も高い値を示したS×H交雑種の中で、苫小牧4の家系は、俄虫106の家系よりも容積密度数は低い値を示したが、胸高直径は大きな値を示した。

それぞれの家系について、髓から6年輪目の平均の年輪幅、晩材幅および晩材率を表4-4-11に示した。S×Hは、S×VおよびS×Sと比べて晩材幅が広く、高い晩材率を示した。このことから、S×Hの容積密度数が、S×VとS×Sよりも有意に高い値を示した原因のひとつは、晩材率が影響していると推察される。

次に、ウラジロモミ、シラベおよびトドマツの成木の容積密度数と年輪幅の測定結果を表4-4-12に示した。それぞれの樹種について、髓から10年輪目以内と11-25年輪までの容積密度数を比べると、容積密度数は10年輪目以内とそれ以降の部位との間に、大きな差が見られなかったが、年輪幅では10年輪目以内は、それ以降の部位よりも

表4-4-10 容積密度数について母樹家系を要因とした分散分析結果

| 自 由 度 |     | 平 均 平 方  |         | 分散比      |
|-------|-----|----------|---------|----------|
| 家系間   | 家系内 | 家系間      | 家系内     |          |
| 5     | 40  | 1994.474 | 299.526 | 6.659 ** |

母樹家系:S×H:2家系, S×V:2家系, S×S:2家系。

母樹トドマツ: 苫小牧4および俄虫106。

\*\* : 危険率1%水準で有意。

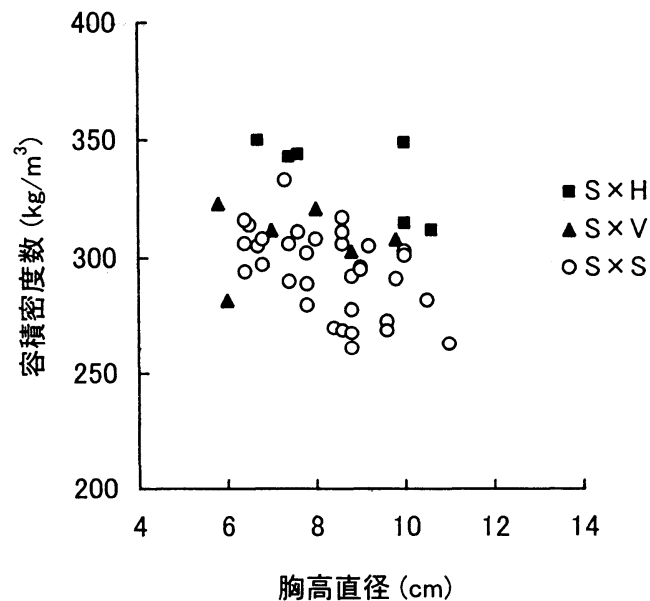


図4-4-6 交雑種とトドマツ家系の胸高直径と容積密度数の関係

■ S×H: トドマツ×ウラジロモミ, ▲ S×V: トドマツ×シラベ,  
○ S×S: トドマツ×トドマツ。

表 4-4-11 種間雑種とトドマツ家系の6年輪目の平均年輪幅、  
晩材幅および晩材率の測定結果

| 区 分    | 母樹名   | 花粉親    | 略号  | 年輪幅<br>(mm) | 晩材幅<br>(mm) | 晩材率<br>(%) |
|--------|-------|--------|-----|-------------|-------------|------------|
| 種間雑種   | 苫小牧4  | ウラジロモミ | S×H | 7.09        | 0.71        | 10.0       |
|        | 俄虫106 | ウラジロモミ | S×H | 5.03        | 0.55        | 10.9       |
|        | 苫小牧4  | シラベ    | S×V | 5.72        | 0.44        | 7.7        |
|        | 俄虫106 | シラベ    | S×V | 4.97        | 0.36        | 7.2        |
| トドマツ家系 |       |        |     |             |             |            |
|        | 苫小牧4  | トドマツ   | S×S | 5.55        | 0.33        | 5.9        |
|        | 俄虫106 | トドマツ   | S×S | 6.59        | 0.46        | 7.0        |

表 4-4-12 3樹種の容積密度数と年輪幅の測定結果

| 樹 種    | 容積密度数 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |              |               | 年 輪 幅 (mm)        |      |              |               |
|--------|----------------------------|------|--------------|---------------|-------------------|------|--------------|---------------|
|        | 髄からの年輪数                    |      |              |               | 髄からの年輪数           |      |              |               |
|        | 全体 (1-25)<br>Avg.          | Std. | 1-10<br>Avg. | 11-25<br>Avg. | 全体 (1-25)<br>Avg. | Std. | 1-10<br>Avg. | 11-25<br>Avg. |
| ウラジロモミ | 387                        | 31   | 385          | 389           | 3.8               | 1.0  | 4.4          | 3.2           |
| シラベ    | 316                        | 13   | 319          | 314           | 3.8               | 1.2  | 4.4          | 3.4           |
| トドマツ   | 328                        | 19   | 329          | 327           | 4.0               | 1.3  | 4.5          | 3.7           |

Avg.: 平均値, Std.: 標準偏差。

表 4-4-13 3樹種の容積密度数と年輪幅における樹種を要因とした  
分散分析結果

| 形 質   | 自 由 度 |     | 平 均 平 方   |         | 分散比       |
|-------|-------|-----|-----------|---------|-----------|
|       | 樹種間   | 樹種内 | 樹種間       | 樹種内     |           |
| 容積密度数 | 2     | 53  | 28195.949 | 538.918 | 52.320 ** |
| 年輪幅   | 2     | 53  | 0.354     | 1.390   | 0.255 n.s |

\*\*: 危険率1%水準で有意, n.s: 非有意。

広い傾向を示した。容積密度数および年輪幅に関して樹種を要因とした分散分析の結果、容積密度数は樹種間に有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められたが、年輪幅では有意差が認められなかった (表 4-4-13)。このことから、本研究に供したウラジロモミの容積密度数は、シラベとトドマツよりも有意に高くなることが示唆された。髄から11-14年輪の平均晩材率では、ウラジロモミは23%、シラベは9%、トドマツは11%であった。ウラジロモミの容積密度数の高い要因のひとつは、一般的に針葉樹で知られているように、晩材率が高いことによると考えられる。このことから、S×Hの高い容積密度数は、花粉親であるウラジロモミの容積密度数が影響していると考えられる。

以上の結果から、ウラジロモミの容積密度数は、シラベとトドマツに比べて高く、S×Hの交雑によって容積密

度数を高める育種的な改良効果が期待される。しかし、シラベの容積密度数はトドマツに比べて大きな差がなく、 $S \times V$ の交雑では、容積密度数を高める改良効果は少ないと推察される。

異郷土樹種の導入には、そのまま造林樹種として使用する場合と、導入樹種の持つ特性や遺伝性を新たに育種素材として利用する場合がある(柳沢, 1961)。本研究において、ウラジロモミはシラベとトドマツに比べて、容積密度数が高いことが示され、供試した $S \times H$ は、 $S \times V$ および $S \times S$ に比べて高い容積密度数の値を示した。これは、花粉親に用いたウラジロモミの遺伝的な特性が影響している可能性を示唆している。既往の報告によると、容積密度数の高い樹種の順は、シラベ、トドマツ、ウラジロモミ(林業試験場, 1982)であり、本調査結果と異なっていた。本研究では、本州から北海道に導入されたウラジロモミは、上記3樹種の中で容積密度数は最も高い値を示した。現在のところ、北海道に植栽されたことにより、このような特性を獲得したのかどうか明らかではない。今後は、ウラジロモミのいくつかの産地、また複数の家系について検討する必要がある。

#### 4.4 要 旨

本節では、トドマツの自然交配、人工交配、並びにトドマツとウラジロモミおよびシラベの種間雑種の家系を供試して、成長と材質に関する遺伝変異を調べた。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 自然交配家系では、分散分析の結果、地上高3.6m部位の直径で危険率5%水準、樹心部と辺縁部の容積密度数および辺縁部の年輪幅では、危険率1%水準で家系間に有意差が認められた。樹心部と辺縁部の関係については、容積密度数は相関係数0.653の有意な正の相関( $p < 0.01$ )を示したが、年輪幅では相関を示さなかった。このことから、容積密度数は遺伝性があり、年輪幅と比べて、比較的早期に家系間の評価が可能であることが示唆される。
- (2) 人工交配家系では、分散分析の結果、樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数、および諸節枝形質に危険率1%水準で、年輪幅では危険率5%水準で家系間に有意差が認められた。容積密度数については、両親クローンの平均値および交配家系の測定値との間に、相関係数が0.583と有意な正の相関( $p < 0.05$ )を示し、親子回帰から推定した狭義の遺伝率は0.58と比較的高い値を示した。年輪幅では、親子間に相関が見られなかった。このことから、容積密度数では、母樹および花粉親の特性が平均して、子供家系に遺伝していることが示唆される。
- (3) モミ属種間雑種では、ウラジロモミの容積密度数はシラベに比べて高く、 $S \times H$ の交雑では容積密度数を高める育種的な改良効果が期待されるが、 $S \times V$ の交雑では、容積密度数を高める改良効果は少ないことが示唆された。
- (4) 以上の結果から、トドマツの容積密度数は、母樹と花粉親の特性が遺伝していることが示唆され、母樹の特性に加えて、花粉親の特性が重要になると考えられる。従って、採種園の改良に当たり、容積密度数の低い精英樹クローンを除去することで、低密度材の種子の生産を減少できる可能性が期待される。

#### 第5節 総 括

本章ではトドマツについて、精英樹クローンの成長と材質、および実生家系である自然交配家系、人工交配家系並びにモミ属の種間雑種の材質に関して調査した。得られた結果から、以下の結論を得た。

- (1) トドマツ精英樹では、樹高、胸高直径、容積密度数、辺・心材含水率、水食い材率、動的ヤング係数、節枝数、輪生枝数および輪生枝の節枝数でクローン間に有意差が認められた。また容積密度数については、髄周辺を除い

た樹心部の容積密度数,あるいは辺材部の生材含水率からの容積密度数の推定により,個体選抜・評価ができる可能性が示唆された。

陸別102は,容積密度数が高く,水食い材率の低い精英樹クローンであり,材質育種を進めるための母樹および花粉親として期待される。

- (2) トドマツ精英樹クローンの心材の平均含水率は77%,平均の水食い材率は26%であり,両形質の間には,有意な正の相関が示された。両形質は,クローン間に有意差も認められ,遺伝性の高い形質であることが推察された。水食い材率では,成長および材質形質との間に有意な相関が見られず,比較的独立した形質と考えられる。
- (3) 樹高と胸高直径の反復率は,10年生以降で減少し,樹高が0.43,胸高直径が0.40を示した。複数の採種園における20年生と25年生の平均反復率は,樹高が0.17~0.18,胸高直径が0.23~0.24を示したことから,これらの成長形質の再現性は低いと考えられる。一方,材質形質の反復率については,容積密度数の辺縁部が0.48,樹心部が0.34,水食い材率が0.62,動的ヤング係数が0.50を示した。このことから,これらの形質は,樹高と胸高直径に比べて遺伝的要因の寄与が高く,再現性が比較的高いことが示唆された。
- (4) トドマツ実生家系は,樹高,胸高直径,容積密度数,動的ヤング係数および節枝形質で家系間に有意差が認められた。両親クローンの平均値と家系の測定値との間に,相関係数0.583の有意な正の相関が示された。また,親子回帰から推定した容積密度数の狭義の遺伝率は,0.58と比較的高い値を示した。さらにトドマツが母樹で,ウラジロモミが花粉親である種間雑種の容積密度数は,トドマツ種内交配種と比べて高い値を示した。このことは,花粉親であるウラジロモミの容積密度数が高いことが要因のひとつであると考えられる。
- (5) 特に容積密度数については,母樹と花粉親の特性が子供家系に影響することが示唆された。従って,花粉親を特定できない採種園では,採種するための精英樹クローン(母樹)の周辺に植栽されている精英樹クローン(花粉親になる可能性がある)の配置が問題になると考えられる。このことから,採種園の改良に当たり,容積密度数の低い精英樹クローン(母樹および花粉親)を除去することで,低密度材につながる種子の生産を減少できる可能性のあることが推察される。

心材含水率に関してクローン間変異が認められたが,今後,水食い材について,実生家系における調査・研究を進めて,その遺伝性を明らかにする必要がある。

## 第5章 結 論

本研究は,精英樹選抜育種事業で選抜された育種素材およびその子供家系などの由来の明らかな材料を用いて,北海道の主要な針葉樹造林木であるグイマツとカラマツの種間雑種のグイマツ雑種F<sub>1</sub>,アカエゾマツおよびトドマツの材質変異について検討し,北海道における材質育種の方針性を明らかにすることを目的とした。さらに,母樹と花粉親の材質に関する遺伝性から,母樹と花粉親の材質を考慮した採種園の改良の可能性を検討した。研究に基づく結果から,以下の結論を得た。

### 1. グイマツとカラマツの種間雑種の材質育種

グイマツは,カラマツよりも容積密度数が高い傾向を示し,導入された両樹種は,郷土樹種のアカエゾマツおよびトドマツよりも高い容積密度数を示した。両樹種における容積密度数の半径方向の変動は,髄周辺が最も低く,年

輪数が増加するに従い高くなり、髓から21年あるいは25年輪以降で減少する傾向を示した。

容積密度数の反復率については、グイマツで0.80～0.87、カラマツで0.51～0.56の比較的高い値を示した。従って、両樹種の容積密度数は再現性があり、遺伝性が高いと考えられる。

林齢9年において、グイマツとカラマツの種間雑種のGL（グイマツ×カラマツ）は、LL（カラマツ×カラマツ）と比べて樹高、胸高直径が優れ、根元曲りおよび幹曲りが少なく、容積密度数、動的ヤング係数で有意に高い値を示した。これらの形質では、カラマツはグイマツと交雑することにより育種的な改良効果を示したが、繊維傾斜度では育種的な改良効果が認められなかった。またGLは、LLに比べて野ねずみによる食害がかなり減少することが明らかになった。

GLとLG（カラマツ×グイマツ）の正逆交雑家系の間に、樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度で有意差が認められなかったが、GLはLGよりも、根元曲りおよび幹曲りで有意に優れていた。またGLおよびLGでは、樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度で家系間に有意差が認められた。それぞれの形質において、母樹として、その家系で高い値を示すクローンは花粉親としても高い値を示し、母樹として、その家系で低い値を示すクローンは花粉親としても低い値を示す傾向を示した。このことから、母樹と花粉親に関する形質の材質特性が遺伝すると考えられるため、母樹と花粉親の材質に関する特性を把握することが重要である。繊維傾斜度は、胸高直径、容積密度数および動的ヤング係数とは比較的独立した形質であることが示唆された。さらに、GLの容積密度数は、両親クローンの平均値と子供家系の測定値との間に、有意な正の相関（ $r = 0.764^{**}$ ）を示し、親子回帰から推定された狭義の遺伝率は0.66と比較的高い値を示した。

以上の結果から、GLの材質については容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度で家系間に有意差が認められ、優れた形質を持つグイマツとカラマツの交雑組合せにより、GLの優れた材質品種の開発の可能性が示唆された。また、これらの形質は、比較的早期に評価できることが示唆されたため、育種年限の短縮の可能性が期待される。

## 2. アカエゾマツの材質と遺伝変異

アカエゾマツ精英樹クローンは、樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数および節枝諸形質でクローン間に有意差が認められた。複数の採種園を調査した結果、樹高、胸高直径および容積密度数では、遠隔地に植栽された共通クローンの間に有意な正の相関が示され、反復率は林齢25年の樹高で0.24～0.52、胸高直径で0.43～0.67を示した。また、容積密度数の反復率は0.71～0.80と高い値を示した。さらに、容積密度数と動的ヤング係数との間に、有意な正の相関が認められた。

精英樹クローンおよび産地別に植栽された次代の容積密度数については、北海道の脊梁山脈の東部地域は、西部あるいは北部地域と比べて有意に高い値を示した。また精英樹クローンは、容積密度数、動的ヤング係数および節枝諸形質で産地間に有意差が認められた。節枝数の少ない産地は、比動的ヤング係数が高い傾向を示したため、有節材の比動的ヤング係数は節枝数に影響されると考えられる。

以上の結果から、アカエゾマツの材質については、容積密度数および動的ヤング係数でクローン間変異が確認された。また、容積密度数の反復率が高いことから、再現性があり、遺伝性が高い形質であることが示唆されたため、育種的な改良効果が期待される。なお本研究の結果に基づいて、容積密度数および動的ヤング係数で高い値を示し、かつ成長を考慮して精英樹5クローン（留辺蘂110、弟子屈106、弟子屈110、阿寒101、大雪108）を採種母樹および交配素材として推奨品種に指定し、その普及が期待される。

### 3. トドマツの材質変異と育種

トドマツ精英樹クローンは、樹高、胸高直径、容積密度数、心材含水率、水食い材率、動的ヤング係数、繊維傾斜度および節枝諸形質でクローン間に有意差が認められた。複数の採種園を調査した結果、反復率は、20年生および25年生の樹高で0.06～0.27、胸高直径で0.15～0.34と比較的低い値を示した。遠隔地に植栽された共通クローン間の樹高では、相関を示さない採種園の組合せが多く存在した。従って、トドマツ精英樹クローンの樹高および胸高直径は、アカエゾマツ精英樹クローンと比べて再現性が低いことが考えられる。一方、材質形質の反復率は、容積密度数で0.34～0.48、水食い材率で0.62および動的ヤング係数で0.50の比較的高い値を示した。水食い材率については、胸高直径、容積密度数および動的ヤング係数とは比較的独立した形質であることが示唆された。

精英樹の自然交配および人工交配による実生家系では、容積密度数で家系間に有意差が認められた。またトドマツが母樹で、ウラジロモミが花粉親である種間雑種は、容積密度数が高くなる傾向を示したが、これはウラジロモミの容積密度数が高いことが、子供の容積密度数を高める要因であると推察される。さらに、人工交配家系の容積密度数は、両親クローンの平均値と子供家系の測定値との間に有意な正の相関( $r = 0.583^*$ )を示し、親子回帰から推定された狭義の遺伝率は0.58と比較的高い値を示した。

以上の結果から、トドマツ造林木の材質における重大な欠点といわれる低密度材および凍裂を誘発する水食い材について、クローン間変異が確認された。このことから、これらの次代に関する育種的な改良の可能性が示唆される。特に、容積密度数は推定された狭義の遺伝率が比較的高いことから、低密度材の出現が少ない種苗を供給するため、採種園から低密度材の精英樹クローンを除去することが重要であると考えられる。精英樹クローンの陸別102は、容積密度数が高く水食い材率が低い値を示した。このような特性を有するクローンを、採種母樹および交配素材にすることが重要である。

### 4. 材質形質の遺伝性および採種園の改良

GLの交雑親であるグイマツとカラマツ、およびアカエゾマツの精英樹クローンでは、容積密度数の反復率が0.51～0.87と高い値を示し、トドマツでは反復率が0.34～0.48を示した。調査対象の樹種において、容積密度数は、樹高および胸高直径の成長形質より高い反復率を示したため、比較的環境の影響を受け難く、再現性がある遺伝性の高い形質であることが示唆された。また、容積密度数と動的ヤング係数との間に、有意な正の相関が示されたため、両者は関係の深い形質であることが示唆された。このことから、精英樹クローンの容積密度数および動的ヤング係数の育種的な改良が期待される。

一方、精英樹の実生家系のGLおよびトドマツの容積密度数では、両親クローンの平均値と子供家系の測定値による親子回帰から推定された狭義の遺伝率が0.58～0.66の比較的高い値を示したことから、母樹および花粉親の容積密度数に関する特性が子供家系に平均して遺伝していると考えられる。しかし年輪幅は、両親と子供家系の間に有意な相関を示さなかった。従って、採種園の改良・管理に当たり、植栽されている精英樹クローンの材質に関する特性が重要になる。容積密度数の低い精英樹クローンを除去するとともに、容積密度数の高い精英樹クローンを植栽することで、容積密度数の高い子供家系の種苗の生産を増加させ、逆に容積密度数の低い子供家系の種苗生産を低減できる採種園を、誘導できる可能性が期待される。

## 5. 北海道における材質育種の方向性

### 5.1 実生家系の成長および容積密度数

材質育種を進めるための樹種の選定に当たり、造林樹種として確実に成林することが前提となる。このため、成長、病虫獣害および気象害に対する抵抗性、適応性などの樹種特性を把握することが重要である。

成長についてみると、養苗期間では、GLを含むカラマツが2～3年、アカエゾマツが6～7年、トドマツが5～6年である。本研究で調査した実生における植栽木の成長において、林齢9年におけるGLでは樹高が7.1～7.9m、胸高直径が8.3～10.6cm、また、LLでは樹高が6.4～7.5m、胸高直径が6.7～8.6cmを示した。アカエゾマツの林齢19～21年では、樹高で6.2～8.3m、胸高直径で7.5～13.5cmを示した。トドマツについては、林齢11年の試験地では、樹高が4.8～5.7m、胸高直径が7.2～8.9cmを示し、林齢16年の試験地においては、樹高が5.4～6.9m、胸高直径が8.8～11.9cmを示した。これらの樹種の植栽地は異なるため単純な比較はできないが、GLおよびLLは、アカエゾマツおよびトドマツに比べて養苗年数が半分程度であり、初期成長が早いことが示唆される。林木育種センター北海道育種場の試験地に植栽されたGL、LLおよびトドマツの胸高部位の年輪数では、林齢9年生のGLおよびLLで7年輪、トドマツでは、林齢11年で7年輪、林齢16年で11年輪であった。このため、植栽後、胸高部位の樹高になるまでGLおよびLLで2年、トドマツで4～5年を要していた。

一方、育種場の試験地に植栽された樹種の容積密度数については、林齢9年生のGLで369～420kg/m<sup>3</sup>、LLで365～388kg/m<sup>3</sup>を示した。トドマツの場合、林齢11年の試験地では285～302kg/m<sup>3</sup>を示し、林齢16年の試験地においては304～348kg/m<sup>3</sup>を示した。いずれの容積密度数も、未成熟材での測定値である。グイマツ、カラマツおよびトドマツでは、未成熟材に相当する樹心部と成熟材に相当する辺縁部との間に、有意な正の相関が認められた。このことから、未成熟材における測定値で、供試材料間の比較、評価が可能であることが明らかとなった。本研究において、GLおよびLLの未成熟材の容積密度数は、トドマツよりも高く、構造用材としての利用に有利であることが判明した。しかも林齢9年生において、母樹と花粉親による家系間変異が確認された。さらに、交雑親の特性が遺伝していることが示唆されたため、材質に関する育種年限の短縮が期待される。

以上の結果から、GLおよびLLは、アカエゾマツおよびトドマツに比べて初期成長が早く、早期に材質を評価できる可能性があり、育種の点で有利である。またGLは、LLと比べて根元曲りと幹曲りが少なく、かつ容積密度数が高いことから、材質に関する育種的な改良により優れた品種の開発が期待される。なお造林されたLLは、野ねずみに被害されやすく、釧路試験地ではLLがほとんど生存していなかったため、LLの造林では、今後とも野ねずみ対策が重要な課題となる。

### 5.2 材質育種の方向性

材質育種については、対象樹種の材質に関する欠点を改善することと、利点を伸ばすための2種類の研究が考えられる。

アカエゾマツについては、初期成長がGLおよびLLより遅く、髄周辺で圧縮材が形成されやすいため、容積密度数を早期に評価することが困難であると推察される。しかし、容積密度数でクローン間変異が大きいと、採種園において容積密度数の低い精英樹クローンを除去することにより、採種園産種苗において、材質改良ができる可能性があることが期待される。

トドマツ材の大きな欠点は、低密度材および水食い材の出現であり、これらの形質にはクローン間変異のあるこ

とが判明した。また容積密度数は、遺伝性の高い形質であることが示唆された。従って、採種園において、容積密度数の低い精英樹クローンを除去すること、また造林地の選定に当たり、凍裂が生じる危険性のある地域での植栽を避ける必要があると考えられる。

グイマツとカラマツの種間雑種の場合、林齢9年生におけるGLは、カラマツに比べて根元曲り、幹曲りおよび野ねずみの被害程度が改善され、容積密度数および動的ヤング係数の値が向上することが示唆された。またGL家系で樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度で家系間に有意差が認められた。これらの形質については、交雑親を選定することで育種的に改良できることが示唆された。

以上の結果から、北海道において、GLは、初期成長が早く、しかも造林上の安全性が比較的高いので、材質の育種的な改良効果が期待される。さらに、容積密度数の狭義の遺伝率が高いことが確認され、動的ヤング係数および繊維傾斜度についても、狭義の遺伝率が高いことが示唆された。これらの形質は、早期に評価できることが示唆されたため、消費者のニーズに対応した、材質の育種的な改良の可能性があると考えられる。さらに繊維傾斜度は、成長、容積密度数および動的ヤング係数とは比較的独立した形質であることが示唆された。従って、これらの形質の優れた母樹と花粉親の組合せにより、優れた品種開発の可能性がある。また、材質形質は成長形質と比べて、遺伝性のあることが示唆されたので、精英樹クローンの材質特性を考慮した採種園の改良・管理が進めば、将来、これらの樹種における材質特性の向上に結びつくことが考えられる。

本研究で得られた成果に基づいて、北海道におけるGL、アカエゾマツおよびトドマツの材質育種の方向性について、各樹種・材質形質毎の育種目標と育種の進め方をモデル化して、図5-2-1に示した。各樹種に共通して、初期成

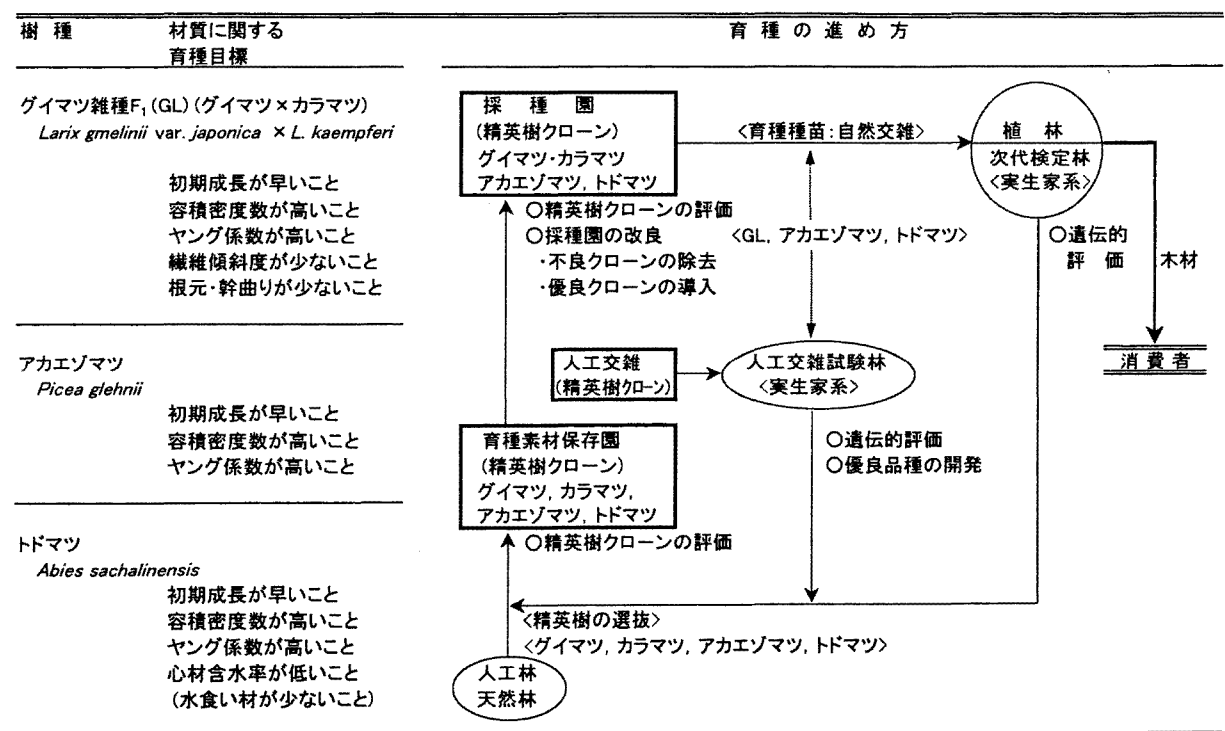


図5-2-1 北海道におけるGL、アカエゾマツおよびトドマツの材質に関する育種目標と育種の進め方

□: 精英樹クローン, ○: 実生

長が早いこと、容積密度数およびヤング係数が高いことが育種目標となる。これらの樹種において、交雑と育種を繰り返しながら、次代の遺伝的評価を行うことによって、優良品種の開発に貢献することが期待される。

自然交雑によって生産される採種園産の育種種苗により、GL、アカエゾマツおよびトドマツの植林を行うため、まず、母樹と花粉親になるグイマツ、カラマツ、アカエゾマツおよびトドマツの精英樹クローンの評価を進め、その結果に基づいて、採種園の不良クローンの除去および優良クローンの導入による改良を行う。また、優良クローン間の人工交雑による品種の開発を行うとともに、自然交雑による精英樹家系で設計された次代検定林と併せて、諸形質の遺伝的な評価を行い、母樹と花粉親の遺伝的な特性評価を進める。さらに、新たな育種素材を導入するため、アカエゾマツとトドマツでは、それら精英樹家系を含めて新たに精英樹を選抜し、一方、グイマツとカラマツについては、人工林あるいは天然林から新たに精英樹を選抜する。このモデルに基づいて育種が循環することで、より優れた育種種苗が供給され、材質的に望ましい木材の生産に結びつくことが期待される。

なお本研究の結果から、容積密度数および動的ヤング係数が高く、繊維傾斜度が比較的小さい特徴を示したGL家系 {中標津4 (グイマツ) × 諏訪16 (カラマツ)} を、材質優良品種として、農林水産省の種苗法に基づく品種の登録に申請する予定である。

## 摘 要

本研究は、北海道における主要な針葉樹造林木であるグイマツ (*Larix gmelinii* var. *japonica*: 母樹) とカラマツ (*L. kaempferi*: 花粉親) の種間雑種のグイマツ雑種  $F_1$  (GL) (*L. gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*)、およびアカエゾマツ (*Picea glehnii*) とトドマツ (*Abies sachalinensis*) を対象に、精英樹選抜育種事業で選抜されたクローンおよびそれらの家系の成長と材質に関して、諸形質の特徴および変異を調べたものである。その目的は、建築用材を考慮した材質について、それぞれの樹種の材質変異および材質育種について検討することである。成長形質として樹高と胸高直径、材質形質として容積密度数と動的ヤング係数を主に調査した。さらに、樹種毎の主な形質として、GLで繊維傾斜度、根元曲りおよび幹曲り、トドマツで水食い材率について調査した。成長と材質形質に関するクローン間および家系間の統計的な差異については、分散分析で評価を行った。得られた成果は、以下のように要約できる。

- (1) GLの交雑親であるグイマツとカラマツの容積密度数は、アカエゾマツとトドマツに比べて高い値を示した。アカエゾマツについては、容積密度数、樹高および胸高直径は、遠隔地に植栽された共通クローンの間に有意な正の相関を示した。トドマツでは、水食い材の生材含水率の範囲が77～244%を示した。水食い材はクローン間に有意差があり、容積密度数、動的ヤング係数および胸高直径とは独立した形質であることが示唆された。
- (2) グイマツ、カラマツ、アカエゾマツおよびトドマツの精英樹クローンの容積密度数は、樹高と胸高直径に比べてクローン間変異が大きく、反復率が高い傾向を示したことから、比較的遺伝性の高い形質であることが示唆された。また容積密度数は、動的ヤング係数との間および辺縁部と樹心部との間に有意な正の相関を示した。このことから、容積密度数については、比較的早期に評価できる可能性がある。
- (3) 林木育種センター北海道育種場の試験地に植栽されている、林齢9年生のGLおよび林齢16年生のトドマツの子供家系では、樹高、胸高直径、容積密度数および動的ヤング係数において、危険率1%水準で家系間に有意差が認められた。GLでは繊維傾斜度においても、危険率1%水準で家系間に有意差が認められた。これは、GLとトド

マツの実生家系において、これらの形質に遺伝変異のあることを示唆している。

また、林齢9年のGLおよび林齢16年のトドマツの子供家系における容積密度数の範囲は、GLで369～420kg/m<sup>3</sup>、トドマツで304～348kg/m<sup>3</sup>を示した。それらのGLおよびトドマツの樹高の範囲は、GLで7.1～7.9m、トドマツで5.4～6.9mを示した。このことから、GLの子供家系は、トドマツに比べて容積密度数が高く、かつ初期成長が早いことが明らかになった。

- (4) GLについては、樹高、胸高直径、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度でグイマツとカラマツの正逆交雑組合せ間に、t検定による有意差が認められず、一方、容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度の材質形質においては、正逆交雑家系間に有意な正の相関が示された。この結果は、これらの材質形質において、交雑親である母樹と花粉親のそれぞれの特性が遺伝していることを示唆している。繊維傾斜度は、胸高直径、容積密度数および動的ヤング係数とは、比較的独立した形質であることが示唆された。また、GLはIL (カラマツ×カラマツ) より根元曲りと幹曲りが小さく、容積密度数が高く、さらに野ねずみに食害され難いことが示された。
  - (5) GLとトドマツの容積密度数については、両親クローンの平均値と子供家系の測定値との間に有意な正の相関が示され、親子回帰から推察された狭義の遺伝率で0.58～0.66の比較的高い値を示した。しかし年輪幅では、両親と子供家系の間に有意な相関が認められなかった。このことから、容積密度数は年輪幅に比べて、遺伝的な改良が期待できることが考えられる。
  - (6) 本研究で得られた結果から、GLは容積密度数、動的ヤング係数および繊維傾斜度の家系間変異を比較的早期に評価できる可能性があり、他の針葉樹造林木より初期成長が早く、容積密度数が高いことが明らかとなった。このことから、GLは北海道において、材質育種の対象樹種として有望であると考えられ、優れた形質の母材間の交雑により、さらに望ましい形質を有するGL品種の開発が期待される。
- 一方、グイマツ、カラマツ、トドマツおよびアカエゾマツの材質形質は、成長形質と比べて、かなり遺伝性が高いことが示唆されたため、精英樹クローンの材質特性に基づいた採種園の改良・管理により、優良な種子の供給ができる可能性が期待される。

最後に、本研究から得られた結果に基づいて、北海道における針葉樹造林木の材質育種の進め方に関するモデルを提案した。この概念は、北海道の林木遺伝育種の推進に貢献することが期待される。

## Summary

In hybrid larch F1 (GL) (guimatsu: *Larix gmelinii* var. *japonica* (mother tree) × karamatsu: *L. kaempferi* (pollen tree)), akaezomatsu (*Picea glehnii*), and todomatsu (*Abies sachalinensis*), which are popular plantation trees of boreal conifer in Hokkaido, the characteristics and variations in the growth and wood quality of the clones from plus-trees and their offspring families were investigated. The purpose of this study is to examine the variations in wood quality in respective species, and then based on the obtained results to develop the tree breeding in Hokkaido. Tree height and diameter at breast height (DBH) as the growth character, and basic density and modulus of dynamic elasticity (Ed) as the wood quality character, were examined genetically among inter- and intra- species, and the slope of spiral grain and the crooking of root and trunk in GL, and wetwood percentage in todomatsu were also examined. Statistical differences in the growth and wood quality characters among the sample clones and the offspring families were evaluated by analy-

sis of variance. The results obtained are summarized as follows :

(1) Guimatsu and karamatsu woods, which are cross-parent trees of GL, had greater basic density than akaezomatsu and todomatsu woods. In akaezomatsu wood, basic density, tree height, and DBH indicated positive significant correlations between common clones in the two remote orchards. In todomatsu wood, green moisture content in wetwood ranged from 77 to 244%. Although the wetwood showed clonal variation, no significant correlations was found between basic density, Ed, and DBH, suggesting that this character is independent from the others.

(2) In the clonal plus-trees of these 4 species, the mother and pollen trees showed higher clonal variation and repeatability in the basic density than in the tree height and DBH. This result indicates that the basic density is a highly inherited character compared to the growth character.

In addition, basic density showed a significant positive correlation to Ed, and also between core and side woods. These results indicate that the character of greater basic density inherited from the mother and pollen trees could be selected at a relatively early stage.

(3) Statistical analysis of variance on the tree height, DBH, basic density and Ed, and the slope of spiral grain in GL showed positive correlations at a 1% significant level among the offspring families of 9-year-old GL and 16-year-old todomatsu which had been planted in the Progeny Test Stand in Forest Tree Breeding Center, Hokkaido Breeding Office. These results indicate that genetic variation in these characters exists in GL and todomatsu offspring families.

The basic density of the todomatsu and GL offspring families ranged from 304 to 348 kg/m<sup>3</sup>, and 369 to 420 kg/m<sup>3</sup>, respectively. Similarly, tree height in those of todomatsu and GL ranged from 5.4 to 6.9 m, and 7.1 to 7.9 m, respectively. These results reveal that in addition to the character of fast initial growth, the offspring families of GL have greater basic density than those of todomatsu.

(4) In the hybrid larch GL, tree height, DBH, basic density, Ed, and the slope of spiral grain showed no significant correlation between the reciprocal combination families by t-test. However, the latter three wood qualities showed significant positive correlations between these families produced by diallel-crossing. These results support that the offspring families inherit the traits of each cross-parent in terms of the characters of wood quality. The slope of spiral grain showed no significant correlations with DBH, basic density, or Ed, suggesting that it is an independent character among these ones. In addition, GL showed less crooking of root and trunk, greater basic density, and higher resistance to gnawing - vole in comparison with karamatsu.

(5) The basic density of GL and todomatsu showed significant positive correlations between the parent and offspring. The narrow-sense heritability for wood density calculated from the parent-offspring regression showed relatively high values of 0.53 ~ 0.66. However, no significant correlation was found in the average ring width between them. These results indicate that in these species, genetic improvement of basic density could be expected, but not of average ring width.

(6) The results obtained here revealed that GL shows relatively fast initial growth and greater basic density, and that in GL, family variation in basic density, Ed, and the slope of spiral grain can be evaluated at an early stage. These facts suggest that in terms of breeding, GL is apparently superior to other plantation trees of boreal conifers in Hokkaido. It is largely expected that the production of GL cultivars with more desirable characters by hybridization breeding of mother

trees and pollen trees with good wood quality.

On the other hand, the wood quality characters of guimatsu, karamatsu, todomatsu, and akaezomatsu were shown to have high inheritability in comparison with growth characters. As a result, it is expected that appropriate management of orchards based on the characteristics of wood quality in the mother and pollen trees could supply good seeds, leading to the production of trees with desirable wood quality.

Finally, based on the results obtained in the present study, a scheme for tree breeding to improve wood quality in conifer plantation trees in Hokkaido was presented. It is expected to contribute to development of genetical tree breeding program in Hokkaido.

## 謝 辞

本研究は、林野庁林木育種センター北海道育種場における業務で得た情報のうち、日本林学会誌ならびに木材学会誌に掲載された論文（飯塚ら，1999a, 2000a, 2000c, 2000f），および両学会誌に掲載された短報（飯塚ら，2000d, 2001b）ならびにノート（飯塚ら，2001a）を加筆し、取りまとめたものである。

本論文の取りまとめに当たっては、宇都宮大学農学部教授 吉澤伸夫博士より、終始、懇切かつ適切なご指導、校正の労、暖かい激励を賜り、深謝の意を表します。論文の取りまとめに当たり、懇切かつ適切なご指導をいただいた、東京農工大学農学部教授 久保隆文博士、茨城大学農学部教授 森泉昭治博士、宇都宮大学農学部教授 内藤健司博士ならびに宇都宮大学農学部助教授 横田信三博士に、深謝の意を表します。

研究の遂行にあたって、終始ご指導と励ましをいただいた、林木育種センター育種部長 田島正啓博士、育種第2研究室長 藤澤義武博士および遺伝資源研究室 河野耕藏主任研究官に心から感謝いたします。また、研究の推進に当たっては、森林総合研究所北海道支所保護部長 中津 篤博士（現森林総合研究所関西支所保護部長）、森林総合研究所北海道支所 主任研究官 今川一志博士および遺伝研究室 松崎智徳主任研究官、北海道立林産試験場 主任研究員 森泉 周博士および安久津 久材質科長、元東京大学講師 倉橋昭夫博士ならびに北海道大学名誉教授 宮島 寛博士よりご指導、ご助言を賜りました。また、チリ・コンセプション大学森林科学部教授 Ph.D. Luis Valenzuela より、ご教示を賜り、心から感謝いたします。

研究の遂行および論文の取りまとめに際し、林木育種センター北海道育種場 鹿島春美場長（現 JICA 長期派遣専門家）、米田安範場長をはじめ、丹藤 修育種課長、板鼻直榮育種研究室長（現林木育種センター育種第3研究室長）、育種研究室長 星 比呂志博士、生方正俊博士（現林木育種センター遺伝資源研究室長）、織部雄一郎研究官、宮本尚子研究官ならびに林 英司研究官（現林木育種センター育種第3研究室）には、平素から、さまざまな問題に対して適切な助言をいただきました。また、職員の方々には、材料の収集、管理、調査および資料の整理にご理解をいただき、材料の採取では西岡直樹技官および林木育種協会北海道事務所 高橋猛夫主任、資料の整理では佐々木洋一事務官（現林木育種センター総務課）をはじめ、多くの方々のご協力をいただきました。そのほか、ご協力をいただいた北海道森林管理局署の方々にお礼申し上げます。

最後に、林産学へ導いていただいた、元宇都宮大学農学部教授 福原敬彦博士ならびに宮崎大学農学部教授 北原龍士博士、また、終始励ましをいただいた、元森林総合研究所 小池秀夫連絡科長（現森政総合調査研究所参与）、元森林総合研究所四国支所 吉田 稔経営研究室長ならびに森林総合研究所難燃化研究室 原田寿郎博士に心から感謝いたします。

## 引用文献

- 阿部与市 (1996) エゾヤチネズミの異常発生による森林被害—その被害実態と防除対策並びに復旧計画—, 北方林業 48 : 43-46.
- 明石孝輝 (1988) 林木育種における統計処理 (2), 林木の育種 149 : 32-36.
- 明石孝輝 (1989a) 林木育種における統計処理 (3), 林木の育種 150 : 37-41.
- 明石孝輝 (1989b) 林木育種における統計処理 (4), 林木の育種 151 : 32-37.
- 安久津 久 (1996) カラマツ類品種の材質 (第5報), 林産試場報 10 (2) : 1-8.
- 安久津 久 (1997) アカエゾマツ造林木の材質検定 (I) —一般造林木の材質—, 林産試場報 11 (3) : 1-5.
- 安久津 久・飯塚和也 (1997) アカエゾマツ精英樹クローンの材質検定—容積密度と繊維傾斜度について—, 日林北支論 45 : 31-34.
- 安久津 久・飯塚和也 (1998) アカエゾマツ造林木の材質検定 (II) —精英樹クローンの材質—, 林産試場報 12 (2) : 13-21.
- 安久津 久・佐藤真由美・高橋政治・滝沢忠昭 (1990a) カラマツ類品種の生長初期の仮道管長推移の比較, 林産試場報 4 (1) : 12-18.
- 安久津 久・滝沢忠昭・高橋政治・佐藤真由美 (1990b) カラマツ類品種の材質 (第2報), 林産試場報 4 (6) : 12-18.
- 安久津 久・滝沢忠昭・高橋政治・佐藤真由美 (1991) カラマツ類品種の材質 (第3報), 林産試場報 5 (3) : 12-18.
- 安久津 久・佐藤真由美・高橋政治・滝沢忠昭・森泉 周 (1993) カラマツ類品種の材質 (第4報), 林産試場報 7 (6) : 6-15.
- 有馬孝禮 (1988) 木材の強度区分に関する今後の展開, 「構造用木材—強度データの収集と分析」, 木材強度・木質構造研究会編, p65-67, 日本木材学会, 東京.
- 有田 学 (1957) スギ孤立木の枝張りについて, 日林誌 39 : 57-27.
- 有田 学 (1962) スギの品種間における枝張りの差異について, 北大演習林研報 21 : 187-201.
- 有田 学 (1964) 枝張りの遺伝的性質に関する研究, 日林誌 46 : 77-82.
- 旭川営林支局 (1981) 外国樹種見本林, 71pp, 旭川営林支局, 旭川.
- Bendsen, D., Beaulieu, J., Daoust, G., and Poliquin, J. (1994) Wood quality of Norway spruce in plantations in Quebec, Wood Fiber Sci. 26 : 342-353.
- 千葉 茂 (1961) 導入モミ・トウヒの芽出し時期の比較, 北海道の林木育種 4 (1) : 29-32.
- 千葉 茂 (1988) 北海道の林木育種事業 30 年, 日林北支論 36 : 1-7.
- 千葉 茂 (1989) 北海ポプラ：ドロノキの新品種, 北海道の林木育種 32 (1) : 1-4.
- 千葉 茂・永田義明 (1976) カラマツ属の育種に関する研究 (5), カラマツ属の雑種 F<sub>1</sub>, 戻し交雑種, 三重雑種の耐鼠性と遺伝力, 王子製紙林木育種研報 3 : 33-44.
- 千葉 茂・永田義明 (1991) アカエゾマツ高容積重個体の選抜 (1), 水浸漬法による選抜, 北海道の林木育種 33 (2) : 14.
- 千葉 茂・永田義明・幸田秀穂 (1980) カラマツの容積重に関する選抜, カラマツ属の育種に関する研究 (7), 北海道の林木育種 23 (2) : 13-16.

- 千葉 茂・野堀嘉裕・永田義明 (1991) アカエゾマツ高容積重個体の選抜 (2). 軟X線デンシトメトリーによる高容積重要因の解析. 北海道の林木育種 34 (1): 1-3.
- 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. 林木育種場研報 2: 61-107.
- 栄花 茂・河野耕藏・織田春紀 (1988) アカエゾマツ天然林産種苗の産地と家系の変異について. 林木の育種「特別号」: 15-17.
- 遠藤良太・小平哲夫・明石孝輝 (1999) スギのクローンの列状植栽試験地における広義の遺伝率に及ぼす個体間競争の影響. 日林誌 81: 334-337.
- ファルコナー, D. S. (1993) 分散. 「量的遺伝学入門 (原書第3版)」, 田中嘉成・野村哲郎共訳, p165-189, 蒼樹書房, 東京.
- 藤澤義武 (1998) 高度木材利用に適合する品質管理型木材生産への林木育種の対応に関する研究. 林木育種センター研報 15: 31-107.
- 藤原拓也・工藤 修 (1993) 打撃音法による製材の強度等級区分と原木の選別. 日本木材北支講 25: 21-24.
- 深沢和三 (1982) 人工造林木の材質 (林木材質). 「北海道の人工造林木の材質と利用」, 宮島寛・深沢和三編, p9-15, 日本木材学会北海道支部, 札幌.
- 深沢和三・川辺二三夫 (1972) カラマツ, グイマツ材密度の樹幹内分布と未成熟材. 日本木材北支講 4: 43-47.
- 畠山末吉 (1987) 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. 北林試報 19: 1-92.
- Hayashi, E., Iizuka, K., Sueno, S. and Kohno, K. (1998) Relationship between resistance to vole browsing and content of ether extract in bark of larch species and hybrids. J. Jpn. For. Soc. 3: 119-122.
- 東 政義・栄花 茂・菊沢喜八郎・清和研二・高橋幸男・豊田倫明 (1987) ハイブリットカラマツ造林の手引き—グイマツ雑種F<sub>1</sub>—. 165pp, 北海道林務部・北海道林木育種協会, 北海道林業改良普及協会, 札幌.
- 北海道林務部 (1995) アカエゾマツの人工造林の手引き. 39pp, 北海道林業普及協会, 札幌.
- 北海道林産物検査会 (1987) 素材の欠点の測定方法. 「素材の日本農林規格解説」, 北海道林産物検査会編, p76-80, 札幌.
- 北海道水産林務部 (1999) 平成10年度北海道林業統計. p114-124, 北海道水産林務部, 札幌.
- 北海道水産林務部 (2000) 北海道林業統計時系列版. p98-101, 北海道水産林務部, 札幌.
- 北方林業会 (1982) ニホンカラマツ. 「北海道林業技術者必携 上巻 立地・施業・造林・保護」, 北方林業会編, p157-166, 北方林業会, 札幌.
- 飯塚和也・久保田正裕・河野耕藏 (1993) カラマツ類交雑家系の野鼠に対する抵抗性. 日林北支論 41: 175-177.
- 飯塚和也・林 英司・板鼻直榮 (1994a) カラマツ類交配家系および精英樹クローンの野鼠による室内摂食試験. 林木の育種「特別号」: 21-23.
- 飯塚和也・板鼻直榮・大藺 智 (1994b) アカエゾマツ精英樹の縦圧縮強度に関するクローン間差. 日林論 105: 307-308.
- 飯塚和也・林 英司・生方正俊 (1995) アカエゾマツの材質と遺伝変異 (I) —精英樹つぎ木クローンの直径成長と容積密度数の比較—. 林育センター北育年報 16: 68-72.
- 飯塚和也・林 英司・板鼻直榮 (1996a) トドマツの生材含水率の分布および容積密度数との関連性. 日本木材北支講 28: 9-12.

- 飯塚和也・板鼻直榮・大藺 智 (1996b) アカエゾマツの材質と遺伝変異 (Ⅱ) - 節枝出現のクローン間差 - . 林育センター北育年報 17 : 32-37.
- 飯塚和也・板鼻直榮・丹藤 修・上野義人 (1996c) アカエゾマツの節枝の出現状況. 日林北支論 44 : 98-100.
- 飯塚和也・安久津 久・板鼻直榮 (1997) アカエゾマツの材質におけるクローン間差. 日本材北支講 29 : 9-12.
- 飯塚和也・高倉康造・三浦康和 (1998) アカエゾマツの材質と遺伝変異 (Ⅲ) - 容積密度数の樹幹内変動 - . 林育センター北育年報 19 : 35-40.
- 飯塚和也・安久津 久・板鼻直榮 (1999a) アカエゾマツ精英樹クローンの材質変異. 日林誌 81 : 325-329.
- 飯塚和也・安久津 久・河野耕藏 (1999b) 炭素固定能の高い品種の創出 - アカエゾマツの容積密度数の変異および精英樹家系の成長 - . 北海道の林木育種 42 (1) : 14-18.
- 飯塚和也・生方正俊・織部雄一郎 (1999c) ヤチダモの成長と材質の 2, 3 の特徴. 日林誌 81 : 298-304.
- 飯塚和也・林 英司・板鼻直榮 (2000a) さまざまな採種園に植栽されたアカエゾマツ精英樹クローンの成長と材質諸形質の比較解析. 日林誌 82 : 80-86.
- 飯塚和也・板鼻直榮・中戸川 仁 (2000b) アカエゾマツ人工林の成長および容積密度数の特徴 - クロエゾマツとトドマツとの比較 - . 北海道の林木育種 42 (2) : 20-24.
- 飯塚和也・河野耕藏・藤本高明 (2000c) 幼齡のグイマツとカラマツの種間雑種の成長と材質変異. 日林誌 82 : 295-300.
- 飯塚和也・西岡利忠・河野耕藏 (2000d) トドマツとウラジロモミおよびシラベの種間雑種の容積密度数と開葉時期. 日林誌 82 : 196-199.
- 飯塚和也・西岡利忠・河野耕藏 (2000e) グイマツとカラマツの種間雑種における諸形質の遺伝変異. 北海道の林木育種 43 (1) : 5-7.
- 飯塚和也・織部雄一郎・生方正俊 (2000f) トドマツ精英樹クローンの生材含水率の変異. 木材学会誌 46 : 397-405.
- 飯塚和也・高倉康造・生方正俊 (2001a) トドマツ子供家系の容積密度数の変異. 木材学会誌 47 : 44-51.
- 飯塚和也・生方正俊・坂本庄生 (2001b) アカエゾマツの成長および容積密度数の産地間変異. 日林誌 83 : 53-57.
- 今川一志 (1997) トドマツの凍裂. 「樹木の凍裂 - 発生状況とその原因 - 」わかりやすい林業研究解説シリーズ 106, p62-82, 林業科学技術振興所, 東京.
- 今川一志・真田 勝 (1996) 北海道におけるトドマツの凍裂 - 1984 年の調査結果について - . 北方林業 48 : 148-151.
- 今川一志・笹賀一郎・大谷 諄 (1988) ヤチダモ造林木の凍裂に関する研究 - 凍裂の発生状況とその組織学的研究 - . 北大演習林研報 45 : 599-686.
- 石田茂雄 (1952) 北海道に於ける凍裂の発生状況. 北大演習林研報 15 : 303-341.
- 石田茂雄 (1955) トドマツ樹幹の凍裂の形態について. 北大演習林研報 17 : 473-512.
- 石田茂雄 (1963) トドマツ樹幹の凍裂の発生機構, とくにその水喰い材との関係について. 北大演習林研報 22, 273-373.
- 石田茂雄 (1983a) 木材の欠点の二・三について. 北方林業 35 : 3-6.
- 石田茂雄 (1983b) 木材の欠点の二・三について - 2 - . 北方林業 35 : 45-48.
- 石田茂雄 (1986) トドマツの水喰い材と凍裂の発生. 「トドマツの凍裂」, p81-102, 北方林業会, 札幌.
- 石田茂雄・小野寺重男 (1969) 材質. 「カラマツ材の性質と利用」, 半澤道郎・澤田稔共編, p17-47, 北方林業叢書

41, 北方林業会, 札幌.

石原供三・松川篤治 (1939) 主要林木の品種改良 (第1報). 球果植物二三の交雑試験. 日林講: 98-102.

石原供三・松川篤治 (1941) 主要林木の品種改良 (第2報). 第1代雑種に顕れる形質について. 日林講: 126-131.

石井哲夫・深沢和三 (1987) トドマツ水食い材の水分移動に関する研究—樹液成分と壁孔閉鎖—. 北大演習林研報 44: 1277-1305.

岩井吉彌 (1998) 世界の林業の短伐期化と日本の林業—持続可能な森林経営の視点からの検討—. 林業経済 597: 13-21.

蕪木自輔 (1956) 木材材質の森林生物学的研究 (第12報). 北海道野幌地方における造林木の生材含水量. 林試研報 90: 77-108.

蕪木自輔 (1973) トドマツ樹幹の生材含水量, とくにその水食い材との関係について. 東京農工大演習林報 10: 96-107.

Kadomatsu, M., Kudoh, H., and Ujiie, M. (1994) Fundamental wood properties of clones grafted with plus-trees of *Abies sachalinensis* (I) — Using trees thinned from the seed orchard in the forest tree breeding experimental station, Hokkaido University —. Res. Bull. Hokkaido Univ. For. 51: 14-30.

門松昌彦・工藤 弘・秋林幸雄・野田真人・夏目俊二・杉下義幸・竹田哲二・山ノ内 誠・阿部一宏・杉山 弘 (1999) 土壌母材および樹冠の部位別に採種されたアカエゾマツ次代の成長. 北大演習林研報 56: 19-29.

加納 孟 (1956) 木材材質の森林生物学的研究 (第11報) 北海道野幌地方における造林木の材質成長. 林試研報 90: 37-76.

加納 孟 (1973a) 容積密度数の測定法. 「林木の材質」, p61-63, 日本林業技術協会, 東京.

加納 孟 (1973b) 繊維走向の測定法と旋回木理の表示法. 「林木の材質」, p79-82, 日本林業技術協会, 東京.

加納 孟・蕪木自輔 (1953) 木材材質の森林生物学的研究 (第7報) トドマツに於ける樹皮の形態による材質診断の可能性. 林試研報 61: 57-72.

加納 孟・須藤彰司・中川伸策・斉藤久夫 (1973) 材質の早期検定. 「木本作物の育種—早期検定法の開発と利用—」, 木本作物育種研究グループ, p219-228, 農林省林業試験場, 東京.

片寄 麟・工藤 弘・氏家政男 (1992) トドマツ精英樹よりつぎ木されたクローン間の材質の比較 (I) — 発足・愛知採種園の間伐木を用いて—. 北大演習林研報 49: 201-218.

Katayose, T., Ujiie, M., and Kudoh, H. (1992) Clonal differences of some properties for wood quality of grafted plus-trees of *Abies sachalinensis*. J. Jpn. For. Soc. 74: 426-430.

川口信隆・高橋政治 (1972) カラマツ F<sub>1</sub> 類の材質について. 日本木材北支講 4: 52-56.

川口信隆・滝沢忠昭 (1983) 二面交雑家系カラマツ材の材質 (第3報). 林産試月報, 375: 1-10.

川口信隆・高橋政治・大久保 勲 (1986a) アカエゾマツ人工林材の材質 (第1報). 林産試月報 416: 1-10.

川口信隆・高橋政治・大久保 勲 (1986b) アカエゾマツ人工林材の材質 (第2報). 林産試月報 419: 1-9.

川口信隆・滝沢忠昭・高橋政治 (1989) トドマツ精英樹系統の材質. 林産試場報 3 (1): 8-18.

Kennedy, R.W. (1966) Intra-increment variation and habitability of specific gravity, parallel-to-grain tensile strength, stiffness and tracheid length in clonal Norway spruce. Tappi 49: 292-296.

木方洋二 (1985) 比重の変動. 「木材の物理」, 伏谷賢美編, p17-20, 文永堂, 東京.

- 河野耕藏・栄花 茂 (1985) モミ属の種間交雑に関する研究 (I) — トドマツ×ウラジロモミ・シラベの交雑親和性 —. 日林北支論 34 : 139-141.
- 河野耕藏・織田春紀・栄花 茂 (1988) カラマツ類の種内および種間交雑の苗木生産能力と雑種苗木の生長. 日林論 99 : 247-248.
- 小泉章夫 (1988) 生立木の非破壊材質試験—樹幹のヤング係数を測定する—. 北方林業 40 : 2-6.
- 小泉章夫・高田克彦・上田恒司・片寄 麟 (1990a) カラマツ精英樹の肥大成長と材質 (第1報). 木材学会誌 36 : 98-102.
- 小泉章夫・高田克彦・上田恒司 (1990b) カラマツ精英樹の肥大成長と材質 (第2報). 木材学会誌 36 : 704-708.
- 今田敬一・佐々木準長 (1959) 凍害と霜害. 北方林業叢書 13, 198pp, 北方林業会, 札幌.
- 工藤 弘・片寄 麟・氏家政男 (1993) トドマツ精英樹よりつぎ木されたクローン間の材質の比較 (II) — 築別, 塩狩, 岐阜採種園からの間伐クローンの性質 —. 北大演習林研報 50 : 179-205.
- 工藤 弘・門松昌彦・野田真人・夏目俊二・秋林幸雄・湊 克之・高畠 守・有倉清美・杉山 弘・水野久男 (1998) 土壌母材を異にしたアカエゾマツの産地試験. 北大演習林研報 55 : 74-86.
- 倉橋昭夫 (1988) カラマツ属の交雑育種に関する研究. 東大演習林報 79 : 1-94.
- 倉橋昭夫 (1989) グイマツ×カラマツ雑種 F<sub>1</sub> の育種. 北海道の林木育種 32 (1) : 5-8.
- 倉橋昭夫 (1995) 交雑品種「東演1号」の特性—グイマツ v-544 × カラマツ v-307 —. 北海道の林木育種 38 (1) : 9-10.
- 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.
- 倉橋昭夫・濱谷稔夫 (1982) エゾマツ及びアカエゾマツの二・三形質の標高に伴う変異. 北海道の林木育種 24 (2) : 27-31.
- 倉橋昭夫・木佐貫博光 (1995) トドマツ標高産試験の18年間の結果. 平成6年度科学研究費補助金 (一般研究C) 研究成果報告書, トドマツの垂直分布に伴う遺伝的変異に関する研究 : 5-7.
- 倉橋昭夫・佐々木忠兵衛・濱谷稔夫 (1969) 導入モミ属の開葉期と耐霜性. 日林北支講 18 : 128-132.
- 倉橋昭夫・高橋延清・佐々木忠兵衛・濱谷稔夫 (1973) トドマツとシラベの種間雑種の諸特性. 日林北支講 22 : 140-145.
- 倉橋昭夫・佐々木忠兵衛・高橋康夫・濱谷稔夫 (1974) 本州産モミ属3種の導入適応性—北海道演習林における苗の生育—. 東大演習林報 66 : 239-250.
- 倉橋昭夫・小笠原繁男・濱谷稔夫 (1990) トドマツの垂直分布に伴う変異—標高産地試験13年間の結果—. 日林論 101 : 303-304.
- 倉橋昭夫・小笠原繁男・井口和信・濱谷稔夫 (1993) トドマツの垂直分布に伴う変異—標高産地別次代家系植栽木の19年生時の成長と着花—. 日林論 104 : 417-420.
- Lindströhm, H. (1996a) Basic density in Norway spruce. Part II. Predicted by stem taper, mean growth ring width, and factors related to crown development. Wood Fiber Sci. 28 : 240-251.
- Lindströhm, H. (1996b) Basic density in Norway spruce. Part III. Development from pith outwards. Wood Fiber Sci. 28 : 391-405.
- 丸岡富次郎・栄花 茂 (1975) アカエゾマツの地域性—アカエゾマツの地域毎の子葉頻度及び苗長の地域変異—. 日

- 林北支講 24 : 97-100.
- 丸岡富次郎・栄花 茂・向出弘正 (1972) アカエゾマツの地域性—種子及び雪くされ病の地域変異—. 日林北支講 21 : 159-161.
- 丸岡富次郎・栄花 茂・向出弘正 (1973) アカエゾマツの地域性—子葉数及び苗長の地域変異—. 日林北支講 22 : 152-155.
- 松田正宏 (1983) スギ造林木の形状比と冠雪被害形態. 日林論 94 : 723-724.
- 松尾孝嶺 (1978) 選択. 「改訂増補育種学」, p131-152, 養賢堂. 東京.
- 松崎智徳 (1999a) トドマツの産地特性—直径, 心材含水率, 容積密度について—. 森林総研北海道支所研究レポート 49 : 1-4.
- 松崎智徳 (1999b) トドマツにおける容積密度の産地間変異. 北海道の林木育種 49 (1) : 19-21.
- 松崎智徳・長坂寿俊・今川一志・中村和子・田中京子・岸田昭雄 (1996) トドマツにおける心材含水率の産地変異. 日林論 106 : 269-270.
- 三上 進 (1988) カラマツの材質育種に関する研究—旋回木理の遺伝的改良—. 林木育種場研報 6 : 47-152.
- 宮島 寛 (1980) トドマツ造林木の材質と利用 (第1報). 恵庭産トドマツの生長と基礎材質. 北大演習林研報 37 : 789-815.
- 宮島 寛 (1981) トドマツ造林木の材質と利用 (第2報). 厚賀産トドマツの生長と基礎材質. 北大演習林研報 38 : 305-321.
- 宮島 寛 (1982a) トドマツ造林木の材質と利用 (第3報). 白老産および上芦別産トドマツの生長と基礎材質. 北大演習林研報 39 : 191-212.
- 宮島 寛 (1982b) 人工造林木の材質 (北海道の人工造林の将来への期待). 「北海道の人工造林木の材質と利用」, 宮島 寛・深沢和三編, p109-112, 日本木材学会北海道支部, 札幌.
- 宮島 寛 (1985) 苫小牧地方演習林産造林木 3 樹種の基礎材質. 北大演習林研報 42 : 1089-1115.
- 宮島 寛 (1995) 生長速く用途の広い林の育成を. 林業経済 562 : 1-7.
- 宮島 寛・長谷川賢司 (1978) 交雑カラマツ造林木の材質試験. 北大演習林研報 35 : 139-156.
- 三輪雄二郎 (1996) 生材含水率. 「木材の科学と利用技術Ⅱ. 5. スギ」, p10-13, 日本木材学会研究分科会報告書.
- 永田義明・戸巻邦夫 (1993) グイマツ雑種  $F_1$  の振れに関する選抜. 日林北支論 41 : 169-171.
- 永田義明・戸巻邦夫・千葉 茂 (1992) グイマツ系交雑種,  $GL \cdot F_1$  からの高容積個体の選抜. 北海道の林木育種 34 (2) : 4-7.
- 中川伸策 (1963) 産地別試験地におけるカラマツの基礎材質について. 林試研報 148 : 93-106.
- 中村 昇 (1995) 標高差に伴うトドマツの材質. 平成6年度科学研究費補助金 (一般研究C) 研究成果報告書, トドマツの垂直分布に伴う遺伝的変異に関する研究 : 20-31.
- 中田了五・藤澤義武・平川泰彦・山下香菜 (1998) スギの生材含水率の個体内樹高方向での変化. 木材学会誌 44 : 395-402.
- Nienstaedt, H.・Rimenschneider, D.E. (1985) Changes in habitability estimated with age and site in white spruce *Picea glauca* (Moench) Voss. *Silvae Genet.* 34 : 34-41.
- 日本建築学会 (1995) 木材の許容応力度. 「木質構造設計規準・同解説」, 日本建築学会編, p14-16, 日本建築学会,

東京。

日本木材学会 (1972) 材質に関する組織用語集。木材学会誌 18: 147-152.

西村勝美 (1998) 激減下の国内木材マーケットと国内外の木材産業の動向。林業経済 51 (7): 1-12.

野堀嘉裕 (1995) 林木育種技術の将来。林業経済 562: 16-21.

野堀嘉裕・永田義明・千葉 茂 (1988) 軟X線写真による造林木の容積密度解析 (I) - カラマツクローンにおける高容積密度要因の解析 -。日林論 99: 239-240.

野堀嘉裕・永田義明・法島良治・戸巻邦男・幸田秀穂・千葉 茂 (1991) 軟X線写真によるアカエゾマツの材質解析。日林誌 75: 339-343.

大庭喜八郎 (1972) シンポジウム B: 遺伝子型と環境との交互作用。林木の育種 76: 6-9.

太田貞明 (1994) 節とその影響。「木材活用事典」, 木材活用事典編集委員会編, p52-54, 事典出版センター, 東京.

太田貞明 (1997) 林木の材質検定法 (6) - アカマツ -。林木の育種 183: 39-42.

大島紹郎 (1995) ギヤマツ雑種 F<sub>1</sub> の登録品種「グリーン」の特性。北海道の林木育種 38 (1): 11-12.

大島紹郎 (1998) カラマツの容積密度数における組合せ能力と遺伝率の推移。日林北支論 46: 157-159.

大島紹郎 (2000) 育種種苗によるカラマツ資源保続への期待。日林北支論 48: 17-22.

大島紹郎・錦織正智 (1994) ギヤマツ雑種 F<sub>1</sub> の幹曲がりにおける家系間変異。日林北支論 42: 37-39.

大島紹郎・黒丸 亮 (1995a) ギヤマツ雑種 F<sub>1</sub> における心材色の家系間変異。日林北支論 42: 160-162.

大島紹郎・黒丸 亮 (1995b) ギヤマツ雑種 F<sub>1</sub> の材質における特性。日林論 106: 297-298.

岡田 滋 (1975) アカエゾマツの産地間変異 (I) 苗高と開葉時期の産地間変異。日林誌 57: 305-310.

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。林木育種場研報 1: 15-92.

奥野忠一 (1978) 実験計画法。「応用統計ハンドブック」, 応用統計ハンドブック編集委員会編, p194-317, 養賢堂, 東京.

小名俊博・園田哲也・伊藤一弥・柴田 勝 (1994) ユーカリのパルプ適木としての性質とそのエリート選抜 (I) - パルプ適木としての性質 -。北方林業 46: 315-318.

小名俊博・園田哲也・伊藤一弥・柴田 勝 (1995) ユーカリのパルプ適木としての性質とそのエリート選抜 (II) - 材質育種の有効性とその効率的方法の検討 -。北方林業 47: 18-21.

小野寺重男・川口信隆・高橋政治 (1971) カラマツ造林木品種間の質的差異とチョウセンカラマツ樹幹内の垂直変動。北林産試月報 229: 7-12.

小野寺重男・高橋政治・川口信隆 (1977) 北海道産造林木の材質試験 II。カラマツとその F<sub>1</sub> 類 (ニホンカラマツ, ギヤマツ, チョウセンカラマツ, ギヤマツ F<sub>1</sub>, チョウセンカラマツ F<sub>1</sub>)。北林産試研報 66: 32-110.

織田春紀 (1985) カラマツクローンによる材質形質の遺伝分散の推定 - 繊維傾斜度と容積密度数 -。日林論 96: 287-288.

小沢勝治 (1984) 針葉樹の旋回木理と乾燥ねじれ。100pp, 京都大学学位論文 (農学).

Ridoutt, B.G.・Sorensson, C. T. (1999) Prospects for improving wood quality in radiata pine and eucalyptus through tree breeding。日本木材学会大会発表要旨集 49: 631.

林木育種センター北海道育種場 (1998) 精英樹一覧表。p2-5, 林木育種センター北海道育種場, 江別.

- 林業試験場（1982）木材の構造。「改訂3版木材工業ハンドブック」，林業試験場監修 p55-94，丸善，東京。
- 林政総合協議会（1980）日本の造林百年史。p133-135，日本林業調査会，東京。
- 林野庁（1999）循環型社会の構築に向けた木材産業の振興。「図説林業白書（平成10年度）」，林野庁監修，p91-115，日本林業協会，東京。
- 林野庁林木育種センター（1999）林木育種事業統計（平成9年度）。p14-19，林野庁林木育種センター，十王。
- 林野庁林木育種センター（2000）アカエゾマツ推奨品種特性表（平成11年度）。林木育種センター北海道育種場，10pp，十王。
- Rozenberg, P.・Cahalan, C.（1997）Spruce and wood quality, genetic aspects (a review). *Silvae Genet.* 46 : 270-279.
- 柳幸広登（1998）チリにおける林業・林産業の拡大と林業政策の展開。林業経済 595 : 17-36.
- 佐伯 浩（1985）木材の構造と性質。「木材の構造」，原田 浩編，p180-188，文永堂，東京。
- Sakai, K.・Mukaide, H.（1966）Estimation of genetic, environmental, and competition variances in standing forest. *Silvae Genet.* 16 : 149-151.
- Sakai, K. Mukaide, H., and Tomita, K.（1966）Intraspecific competition in forest trees. *Silvae Genet.* 17 : 1-5.
- 佐野雄三（1996）樹木の凍裂発生要因の研究。北大農邦文紀要 19 : 565-648.
- 島地 謙（1964）樹脂道。「木材解剖図説」，p16-17，地球社，東京。
- 森林総合研究所北海道支所（1994）林況変化に伴う野鼠被害の防除に関する研究。森林総合研究所北海道支所編，177pp，札幌。
- 塩倉高義（1981）針葉樹の未成熟材に関する知見補遺ならびにカラマツ樹幹内における材質変動に関する研究。71pp，九州大学学位論文（農学）。
- 塩倉高義（1982）針葉樹幹材における未成熟材の区分とその範囲。木材学会誌 28 : 85-90.
- 白石則彦・石橋 聡・佐野 真（1997）森林による炭素固定能の評価。日林北支論 45 : 110-113.
- 鈴木昌樹（2000）トドマツ精英樹家系間の強度変異—無欠点小試験体の曲げ強度—。北方林業 52（1）：4-6.
- 鈴木昌樹・藤本高明・安久津 久（1997）育種種苗を用いたトドマツの材質検定。平成9年度林業技術研究発表論文集：96-97.
- 鈴木 茂・志賀敏夫（1976）雑種強勢の遺伝的基礎。植物遺伝学Ⅲ「生理形質と量的形質」，木原均監修，p322-332，裳華房，東京。
- 田嶋謙三（1998）日本林業再生のシナリオのメモ—まず，再生を阻んでいる問題を挙げる—。林業経済 602 : 1-11.
- 高田克彦（1994）樹幹ヤング係数によるカラマツ林木の評価。北大演習林研報 51（1）：115-166.
- 高橋延清・西口親雄・飯塚徳義（1966）カラマツ属の耐鼠性育種。林木の育種 36 : 2-5.
- 高橋延清・柳沢聡雄・久保田泰則（1968）雑種カラマツの生産と利用。北海道林木育種叢書 8，180pp，北海道林木育種協会，札幌。
- 高橋政治・滝沢忠昭・安久津 久・佐藤真由美（1993）トドマツ精英樹系統の材質評価。林産試験場報 7（1）：14-24.
- 高倉康造・飯塚和也（2000）モミ属の交雑家系の特性調査—輪生枝数，節間及び頂芽伸長量，節間枝芽数—。林木育種センター北育年報 21 : 38-41.
- 武井富喜雄（1998）カラマツの材質向上のための施業技術に関する研究。長野県林業セ研報 12 : 1-112.
- 滝沢忠昭・川口信隆（1982）二面交雑家系カラマツ材の材質（第1報）。林産試月報，362 : 1-9.

- 滝沢忠昭・倉橋昭夫・小笠原繁男・川口信隆（1982）二面交雑家系カラマツ材の材質（第2報）. 林産試月報, 367 : 1-8.
- 滝沢忠昭・高橋政治・安久津 久・佐藤真由美・川口信隆・倉橋昭夫（1990）カラマツ類品種の材質（第1報）. 林産試場報 4（1）: 19-26.
- 田之畑忠年（1995）品種登録制度の概要と「北林育1号」の特性. 北海道の林木育種 38（1）: 5-6.
- 館脇 操（1943）アカエゾマツ林の群落的研究. 北大演習林研報 13（2）: 1-181.
- Taylor, F. W., Wang, E. I., Yanchk, A., and Micko, M. M. (1982) Specific gravity and tracheid length variation of white spruce in Alberta. Can. J. For. Res. 12 : 561-566.
- 塚本増久（1958）遺伝データの推計学的取扱い. 現代生物学講座7「遺伝と変異」, 田宮博編, p333-384, 共立出版, 東京.
- 生方正俊・飯塚和也・河野耕蔵（1999）北海道のミズナラにおける葉および堅果の形質の反復率と地理的変異. 日林誌 81 : 305-310.
- 浦上弘幸・牧野利彦（1995）スギ材の動的弾性率と節率の関係. 京都府大演習林報 39 : 43-51.
- 山本千秋・大庭喜八郎（1991）選抜技術. 現代の林学5「林木育種学」, 大庭喜八郎・勝田柁編, p94-115, 文永堂, 東京.
- 柳沢聰雄（1961）主として気候上からみた本道への異郷土樹種の導入に関する考察. 北海道の林木育種 4（2）: 12-24.
- 柳沢聰雄（1963）北海道における外国樹種導入の動向. 北方林業 15 : 1-9.
- 柳沢聰雄（1968）トドマツ・エゾマツ類の種間雑種. 林木の育種 48 : 3-5.
- 柳沢聰雄・服部賢一（1951）トドマツとウラジロモミの種間雑種について（第1報）. 北林試集報 69 : 63-75.
- 渡辺治人（1978）木材の密度の樹幹内変動. 「木材理学総論」, p215-216, 林業新聞社, 大阪.
- Worrall, J. (1975) Provenance and clonal variation in phenology and wood properties of Norway spruce. Silvae Genet. 24 : 2-5.
- Wright, J. W. (1976) Estimation of heritability and genetic gain. "Introduction to Forest Genetic", p239-252, Academic Press, New York.
- 山井良三郎（1988）木材資源の現状と将来. 「木質構造建築読本」, 木質構造研究会編, p97-103, 井上書院, 東京.
- 矢沢亀吉（1964）樹幹内での含水率の分布. 北方林業 16 : 309-314.
- Yazawa, K., Ishida, S., and Miyajima, H. (1965) On the wet-heartwood of some broad-leaved trees grown in Japan. I. Mokuzai Gakkaishi 11 : 71-76.
- 横田俊一（1964）カラマツの先枯病. 北方林業叢書 26, 125pp, 北方林業会, 札幌.
- 横田俊一（1979）トドマツ枝枯病について. 北海道の林木育種 21（2）: 17-24.
- 吉本昌朗・信田 聡・有馬孝禮（2000）トドマツ水食い材と正常材の強度比較. 日本木学会発表要旨集 50 : 107.
- Zobel, B. J. (1971) Genetic manipulation of wood of the southern pines including chemical characteristics. Wood Sci. & Technol. 5:255-271.
- Zobel, B. J. · van Buijtenen, J. P. (1989) Control of wood properties by Breeding. "Wood Variation : Its causes and control", p249-290, Springer-Verlag, Berlin.

Zobel, B. J. ・ Jett, J. B. (1995) The genetics of wood density. "Genetics of Wood Production", p98-125, Springer-Verlag, Berlin.

## 補 遺「用語の解説」

### 打撃音法による動的ヤング係数

ヤング係数は重要な材質指標のひとつで、各種の強度との間には樹種にかかわらず統計的に高い相関が認められている。本研究で用いた打撃音法による動的ヤング係数の測定方法は、丸太の一方をプラスチックハンマーで打撃し、材軸方向の自由振動を起こさせ、この時発生した縦振動の固有振動数をFFTアナライザーで求め、固有振動数と丸太の密度から、“縦振動（すなわち振動音の固有振動数）によるヤング係数”を算出する。

### 反復率

反復率は個体の表現型値のうち遺伝子型値によって決定する割合であり、遺伝的寄与の大きさの目安に用いる。精英樹クローンを対象とした本研究の場合の反復率は、クローン間の遺伝的支配の強さを表す指標である。

### 変異

生物は自然界において著しく変異に富み、その変異は一時的環境変異と永続的な遺伝変異が存在し、育種上重要な意義をもつものは遺伝変異である。育種に当たっては、自然界の変異を探索して、その中にある目的とする有用な変異を見出すことが必要である。

### 表現型

個体または集団の遺伝子の総和が遺伝子型で、それが環境に反応して外部に現れた形質が表現型である。

### 育種

林木を対象とした本研究の育種は、林木の「新種」を開発する、品種改良である。材質育種とは、容積密度数やヤング係数などの材質に関する形質を対象とした品種改良である。

### 育種年限の短縮

1つの新品種を開発するには、育種の計画を立ててから長期間を要することが多い。従って、早期検定等の育種技術の改善によって、その所要年限を短縮することが極めて重要なことである。

### 狭義の遺伝率

狭義の遺伝率は、表現型が親から受け継いだ遺伝子の効果によって決定される割合で、血縁個体間の類似性を表し、育種計画では非常に重要である。狭義の遺伝率の推定には、親に対する子の回帰からの推定と分散分析による推定がある。

### 実生苗

実生苗とは種子を用いて繁殖させた苗である。

### 水食い材

水食い材は通常含水率の低い心材を持つ樹種であるのに、なんらかの原因で、心材およびときには内側の辺材が隣接の辺材部より高い含水率を示すもの。

### 採種園

採種園は精英樹のつぎ木クローンで構成され、造林事業用の種子を生産するために設定される。採種園の改良（体質改善）は、不良クローンの除去、あるいは優良クローンを導入し、生産される種子の遺伝的な質の向上を図ることを目的とする。

### 精英樹クローン

精英樹は、成長と樹形に重点を置いた精英樹（プラス木）選抜育種事業で選抜され、北海道では、つぎ木でクローン化されている。精英樹クローンは、育種素材保存園に植栽・保存され、また採種園に母樹および花粉親として植栽されている。最近、精英樹クローンは農林水産ジーンバンクに登録され、遺伝子保存としての役割も重視されている。

#### 容積密度数

容積密度数は生材中に含まれている木材実質の値で、重要な材質指標のひとつである。

容積密度数 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ) =  $W_0 / V_g \times 1000$  :  $W_0$  : 全乾重量 (g),  $V_g$  : 生材体積 ( $\text{cm}^3$ )。