



Title	樹幹ヤング係数によるカラマツ林木の評価
Author(s)	高田, 克彦; TAKATA, Katsuhiko
Citation	北海道大学農学部 演習林研究報告, 51(1), 115-166
Issue Date	1994-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21381
Type	departmental bulletin paper
File Information	51(1)_P115-166.pdf



樹幹ヤング係数によるカラマツ林木の評価

高田 克彦

Estimation of Wood Quality of Forest Trees of Japanese Larch by Means of
Modulus of Elasticity of Tree Trunk

by

Katsuhiko TAKATA*

要 旨

北海道における主要造林樹種であるカラマツを対象に、立木の樹幹の曲げ変形から求められるヤング係数（樹幹ヤング係数）を指標とする林木の強度材質評価を試みた。実験は北海道内7ヶ所、15林分において行ない、樹幹ヤング係数の測定に供した試験体総数は1359本である。その結果、樹幹ヤング係数の材質指標としての妥当性、樹幹ヤング係数の変動特性に関する知見を得た。また一連の実験から得られた知見をもとに、林分単位での強度材質検定法及び次期植栽事業に関連したカラマツの材質育種の方向性と林木改良の可能性に関して総合的な考察を試みた。

キーワード： 樹幹ヤング係数, カラマツ, 非破壊的試験, 林分評価, 材質育種

目 次

第1章 緒論	116
第2章 既往の研究と背景	118
第3章 樹幹ヤング係数の材質指標としての妥当性	120
3.1 生立木曲げ試験の方法	121
3.2 丸太ヤング係数と樹幹ヤング係数	123
第4章 丸太ヤング係数と諸形質との相互関係	124
4.1 実験	124

1993年9月30日受理 Received September 30, 1993.

*九州大学農学部林産学科木材理学講座

Laboratory of Wood Science, Department of Forest Products, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka 812

4.2 結果と考察	125
4.3 要約	128
第5章 樹幹ヤング係数の年次内変動と経年変動	129
5.1 年次内変動	129
5.2 経年変動	131
5.3 要約	133
第6章 樹幹ヤング係数の林地内変動	135
6.1 実験	135
6.2 結果と考察	135
6.3 要約	138
第7章 カラマツ産地試験林における樹幹ヤング係数	138
7.1 供試林と実験方法	138
7.2 結果と考察	140
7.3 要約	147
第8章 カラマツ精英樹接ぎ木クローンの樹幹ヤング係数	148
8.1 樹幹ヤング係数のクローン間変異	148
8.2 実生子供家系における樹幹ヤング係数の再現性	152
8.3 要約	155
第9章 総合考察	155
摘要	160
参考文献	161
Summary	164

第1章 緒 論

天然材料である木材は、金属などの他の工業材料とは異なり組織的、化学的、及び物理的に極めて多様な特性を有している。すなわち、木材の材料としての性質つまり材質は、樹種間は勿論のこと、同一樹種内において品種や産地間、個体間でかなりの変動を示し、さらには同一個体内においても試料を採取した部位によって異なることが知られている。このような不均質性は、木材が生物体である以上避けることができない宿命的な特性であると同時に、木材の材料的性質の最大の特徴であると言える。したがって、木材資源の有効活用を図るためには、当該樹種の材質変動特性を十分に把握した上で最終用途に応じて等級区分して利用することが最も合理的であると言える。

特に、構造用に利用される製材は、剛性や耐力といった強度性能が重視され、一定の強度保証が要求されることから、最終要求性能である木材強度に応じた応力等級区分の導入が必要であり、そのためには、木材の強度に影響を与える諸因子を的確に把握することが不可欠である。先頃制定された日本農林規格¹⁾では、針葉樹の構造用製材の規格について、従来の材面の欠点等の目視に基づく等級区分に加えて新しくヤング係数による等級区分が導入されることになったが、その根底にあるべき針葉樹材の材質変動については未だに十分な情報が蓄積されて

いるとは言い難い。

一方、木材は林業の最終生産物として位置付けすることができる。我が国における針葉樹造林は、ごく一部の林業先進地を除いて、その生産目標を永らく量的生産の向上にむけてきた。昭和30年代の大規模拡大造林はまさにこの方針に沿って行われた一大事業であるが、大面積一斉造林による病・虫害の発生、除間伐の遅れ等の問題を抱えており満足な結果を得るに至っていない。さらに、これらの造林木のほとんどが利用材質に関する検討がほとんど行われなまま植栽されたものであり、材質のバラツキが大きい集団であると考えられる。しかしながら、従来行われてきている間伐木を用いたJISによる標準試験から得られる情報は限られており、その材質変動を把握するためには基準強度の評価に直結した材質指標による評価を積極的に行っていくことが必要である。

本研究では、以上のような観点から主に北海道における主要造林木であるカラマツ (*Larix leptolepis* Gord. syn. *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) を対象に樹幹ヤング係数による材質評価を試みた。本研究の目的は、樹幹ヤング係数を指標として非破壊的に林木の評価を行なうことであるが、ここでの林木の評価とは、種々の発生要因をもつ林木の材質変動を把握し、これらの知見をもとに、既存する造林地に対する林分単位での強度材質検定法、さらには次期造林事業に関連したカラマツの材質育種と林木改良の方向性を提示するものとして定義した。

本論文は以下のようにまとめられている。

緒論、既往の研究と背景に引き続いて第3章では、本研究で材質指標として用いた樹幹ヤング係数の測定方法を述べるとともに、立木段階で測定される樹幹ヤング係数と丸太の生材状態で測定されるヤング係数との関係を述べた。第4章では、丸太ヤング係数を用いて、樹幹の曲げ変形から求められるヤング係数と胸高直径、年輪幅、晩材率および容積密度数との相互関係を明らかにすると共に、材質指標としての樹幹ヤング係数の有用性を示した。第5章では、同一個体の樹幹ヤング係数の年次内および経年変化を調査し、肥大生長に伴う樹幹ヤング係数の変動を示した。これらの結果から、樹幹ヤング係数の最適測定時期を決定すると共に、その再現性を明らかにした。第6章では、北海道における主要造林樹種であるカラマツ、アカエゾマツおよびトドマツに関して同一林地内での樹幹ヤング係数のバラツキの程度を明らかにするとともに、樹幹ヤング係数と胸高直径および樹高との関係を明らかにした。第7章では、前章までの結果を踏まえ、種子産地を異にするカラマツ集団間における樹幹ヤング係数を含む諸形質の変異を明らかにした。さらに第8章では、カラマツ精英樹候補木接ぎ木クローンを用いて、クローン間における樹幹ヤング係数の変異を明らかにするとともに、その遺伝分散を分散分析によって解析し、その遺伝性を論じた。第9章では、得られた成果を総合的に考察し、樹幹ヤング係数による強度材質評価の有用性とその利用法について述べるとともに、今後の材質育種の方向性について若干の提言を行なった。

本研究を着手するにあたって多くの示唆を賜った、前北海道大学農学部教授 林学博士宮

島 寛先生、研究の遂行と論文の作成に際して終始御指導いただいた北海道大学農学部教授 農学博士深澤和三先生、同教授 農学博士笹谷宜志先生、同教授 農学博士寺澤 實先生ならびに同助教授 農学博士上田恒司先生に心から感謝いたします。また本研究を進めるにあたり多くの御助言と御協力をいただいた北海道教育大学札幌校講師 農学博士小泉章夫先生に謝意を表します。また、供試材料の入手に際して御配慮いただいた北海道大学演習林、林野庁森林総合研究所北海道支所遺伝研究室、林野庁林木育種センター北海道育種場、北海道立林業試験場、三菱マテリアル(株)、並びに新王子製紙(株)林木育種研究所の皆様、さらに研究に係る各種の実験にあたって御協力頂いた、北海道大学農学部木材加工学講座の専攻生であった久保英之氏、白石 誠氏、村川知照氏、杉山祐一郎氏、崎山雅範氏ほか講座の皆様にも厚くお礼申し上げます。

尚、本論文は北海道大学審査学位論文の大要をまとめたものである。

第2章 既往の研究と背景

日本の針葉樹主要造林木は、本州以西においてはスギ、ヒノキ及びアカマツを、北海道においてはトドマツ、カラマツ及びエゾマツを挙げることができる。ここでは、本研究で対象としたカラマツについて、その材質変動の把握する上で意義が大きいと考えられる研究をレビューする。

カラマツは中部山岳地帯を天然分布域とする樹種であるが、拡大造林期を契機に北海道、東北など比較的寒帯な地域への導入が積極的に進められた。特に北海道では拡大造林の担い手として洞爺丸台風による風倒木の処理がほぼ終わった昭和34年頃から積極的に導入され、現在では北海道の全人工林の32%を占め、より積極的な植林が進められた一般民有林では人工林面積の約50%を占めるに至っている²⁾。またその林齢構成をみると、林齢21~40年の林分が極めて多く、特に一般民有林では全体の80%強が林齢30年以下の林分となっており、これらの林分では健全な森林育成のために適切な除間伐等の保育作業が強く望まれていると同時に、当該林分の材質把握が急務とされている。

このような経緯から、カラマツの材質変異に関する研究は中部地方並びに北海道地方で積極的に行なわれてきた。中部地方産カラマツに関しては、容積重や強度的性質の樹幹内分布^{3,4)}、未成熟材での回旋木理⁵⁾、容積密度数と仮道管長との関係⁶⁾、早晚材の比重変異⁷⁾、肥大生長に伴う材質変動⁸⁾が重松らによって精力的に研究されている。また加納は、植栽カラマツを用材として利用する場合、ねじれを考慮すると、心持ち角の寸法は一辺長120mm以上が好ましいとした上で、今後の用途開発の必要性を論じた⁹⁾。さらに、カラマツ材の品質は立地条件によって極めて異なり、平坦地のカラマツ材では欠点による品質低下が小さいことから、カラマツ用材に対する造林、保育法の再検討を説いた¹⁰⁾。一方、北海道産カラマツに関する研究では、宮島が強度的性質について同一地方産の他樹種との比較を通してカラマツの有用性を説くと共にその育林方法を示している^{11,12)}。また宮島は、交雑カラマツの材質についての報告¹³⁾を行なうと共に、

樹勢の衰えと比重の低下との関連性についても言及している¹⁴⁾。また小泉は、施業による容積密度数管理の可能性を示唆すると共に、生育環境が材質に与える影響を調査している^{15,16)}。これらの研究の多くは、用いた種苗の遺伝的情報が未知であるものの、生育環境や施業方法がカラマツの材質に対して強い影響力を持つことを示唆するものである。

一方、カラマツの材質の遺伝性については、ねじれに関して片寄ら¹⁷⁾、三上¹⁸⁾、千葉ら¹⁹⁾が、容積重に関して千葉ら²⁰⁾が遺伝的改良の可能性について報告している。一般に、カラマツの遺伝的変異に関する研究は、種子産地を扱ったものと精英樹クローンを扱ったものに大別することができる。この内、種子産地を扱った研究はカラマツ産地試験林を対象として行なわれた研究が大部分を占める。この試験は1958年から1960にかけて世界13カ国において一斉に開始された国際規模のものであり、当初国内13カ所、国外31カ所合計44カ所の試験林が設定されている。これらの試験林での研究を年代毎に整理すると以下のとおりである。1950年代は、Langner²¹⁾、Schoberら²²⁾が産地試験の紹介と設定条件等を記している。1960年代にはいとこれらの生長および形態形質に関する報告が行なわれはじめ、Langner²³⁾、柳原ら²⁴⁾、柳沢²⁵⁾、Stairs²⁶⁾、梅原ら²⁷⁾、Hattemer^{28,29)}、丸岡³⁰⁾、荒井ら³¹⁾の報告がみられる。また、気象害に関してはSchönbachら³²⁾の報告がある。1970年代にはいと、生長、形態形質に関する研究では、Genys³³⁾、倉橋ら³⁴⁾のほか、北海道林木育種協会からカラマツ産地試験についての合同発表³⁵⁾が行なわれた。また、生長・生理形質に関してFarnsworthら³⁶⁾が、病害・気象害抵抗性に関して千葉ら³⁷⁾、水野³⁸⁾が報告を行なっている。また、この年代に入ると材質形質に関する研究が進められ、荒井ら³⁹⁾が間伐木を用いて幹材積を求めたほか、三上と長坂⁴⁰⁾が繊維傾斜度について、Lee⁴¹⁾はインクリメント・コアを用いて容積密度数および仮道管長についてそれぞれ産地間差異を調査している。また、同位酵素における産地間差異も調査⁴²⁾されるなど広範囲にわたる研究が行なわれており、三上⁴³⁾、Todaら⁴⁴⁾によって全般的な産地特性について概略が取りまとめられている。1980年代では、生長・形態形質に関してRobak⁴⁵⁾、ParkとFowler⁴⁶⁾の研究があり、生長および着花性等の生理的形質に関して倉橋ら⁴⁷⁾の研究がある。材質形質に関連した研究は、Looら⁴⁸⁾がインクリメント・コアを用いて容積密度数について、小泉⁴⁹⁾は、樹幹のヤング係数についてそれぞれ産地間差異を調査している。1990年代に入ると関係各機関から過去の研究を取りまとめた報告⁵⁰⁻⁵²⁾が行なわれてきている。

他方精英樹クローンに関する研究では、先枯れ病抵抗性に関して岸田⁵³⁾、千葉と永田⁵⁴⁾、岸田ら⁵⁵⁾が、落葉病抵抗性に関して鮫島^{56,57)}、千葉と永田⁵⁸⁾がある。これらの研究では病害抵抗性におけるクローン間差異を認めているものの、同時に抵抗性育種の限界を指摘するものも多い。また材質形質に関する研究では、中川⁵⁹⁾が繊維傾斜度について、片寄ら⁶⁰⁾、織田⁶¹⁾が容積密度数と繊維傾斜度について、畠山⁶²⁾、大島ら⁶³⁾は幹の通直性と繊維傾斜度についてそれぞれクローン間差異を明らかにしている。特に畠山は、生長による選抜をした個体群の中にも材質形質に大きな変動があることから、生長量と材質を同時に改良できる可能性を示唆している。

また、野堀ら^{64,65)}は軟X線解析によって容積密度数のクローン間差異の検定および高容積密度要因の解析を行なっている。さらに、小泉ら^{66,67)}、片寄ら⁶⁸⁾は樹幹のヤング係数についてクローン間差異を明らかにしている。

これらのカラマツに対する研究を一望すると、各種抵抗性と生長・形態形質に関する研究が多く、材質形質に関しては繊維傾斜度と容積密度数に関する研究が主流であったことがわかる。

言うまでもなく、針葉樹造林木の最大の需要が製材品としての使用であることを考えると、林木の評価においては各種の木材強度との相関がより高い形質を材質指標とすることが望ましい。材質指標に関して沢田⁶⁹⁾は、材質指標として取り上げる形質は実用上の直接評価に結び付く形質が好ましいとした上で、実用精度の範囲内においてかなりの合理性を持つものとして、ヤング係数を指標とする材質評価法を唱導している。また近年、縦振動波を利用して動的ヤング係数を測定する方法⁷⁰⁾が提案され、製材に対する新しい材質評価法として注目されており、今後ヤング係数を材質指標に用いた研究が増えてくるものと考えられる。

第3章 樹幹ヤング係数の材質指標としての妥当性

前章において述べたように、針葉樹造林木の材質評価を行なう場合、用いるべき材質指標は木材強度の推定に直接的に役立つことが望ましい。また、測定対象が精英樹候補木や各種の検定林の場合には、測定木をそのまま次代の母樹として用いることもあることから、その測定は非破壊的な手段で行なうことが必要である。このような林木の非破壊的な試験の実例としては、ニュージーランドで行なわれている Pilodyn Tester による方法⁷¹⁾や、CTスキャナーを用いる方法⁷²⁾、弾性波の伝播時間を利用して動的ヤング係数を測定する方法⁷³⁾、立木の曲げ変形からヤング係数を測定する方法⁷⁴⁾などがある。

Pilodyn Tester 法の特長はその簡便性であるが、樹皮を取り去った部分に樹幹へ鉄芯を打ち込むことから完全な非破壊試験とは言い難い。また、CTスキャナー法は年輪構造等の詳細な情報を非破壊的に得ることができるが、これらの情報と木材強度との関係は木材比重やヤング係数といった材質のそれに比べて弱く、さらに一度の測定にかかる時間が長く、大型の装置及び電源を必要とする等実用面での問題も多い。弾性波の伝播時間を利用する方法は、比較的簡便であり既に製材品に対する有用性も示されている⁷⁵⁾。しかしながらこの方法の立木への応用は、計算上必要な比重の取り扱いや含水率の影響など解決すべき問題が残っており未だ確立しているとはいえない。

一方、立木の曲げ変形からヤング係数を測定する方法は、測定を無風時に行なうことが条件であり、また測定可能な径級がある程度限られるという欠点を持つものの、本方法で求められた樹幹ヤング係数からは乾燥による増加率を乗じることによって無欠点材のヤング係数を概算でき、さらにそれらに種々の材質係数⁶⁹⁾を乗じることによって無欠点材の基準強度を推定強

度値として求めることができる⁷⁶⁾など実用性が高いことが示されている。そこで本研究では、生立木曲げ試験法によって非破壊的に求められる樹幹ヤング係数を材質指標として用いることとした。

3.1 生立木曲げ試験の方法

樹幹ヤング係数の測定を目的とする生立木曲げ試験の方法を以下に示す。

(1) 供試木の地上高約 220 cm までの枝を払った後、地上高 120 cm と 180 cm の周囲長を測定し、さらに地上高 120 cm で 1 mm 刻みで目盛を刻んだ精密ドライバーによって 3 半径方向の樹皮厚を測定する。

(2) 樹幹の地上高 220 cm 附近にロープを巻き、これよりターンバックルを介して加力梃子を吊り下げる。加力梃子は地上高 180 cm 附近に樹幹に対して水平に突くように取り付け、矢高測定器は 1/1000 mm 精度、5 mm ストロークの角型ゲージセンサー (小野測器: G S 551) を樹幹の凹凸に応じて前後にスライドできるようにしたもので、これを梃子の取り付け部の反対方向の地上高 70-170 cm 区間に取り付け、負荷時の曲げ矢高を測定する。矢高の測定は地上高 70-170 cm 区間で行なうが、傾斜地に生育した供試木などで矢高測定区間において根張りの影響が懸念される場合は、適宜測定部を樹幹上部にずらして試験を行うこととする。Fig. 3.1 に

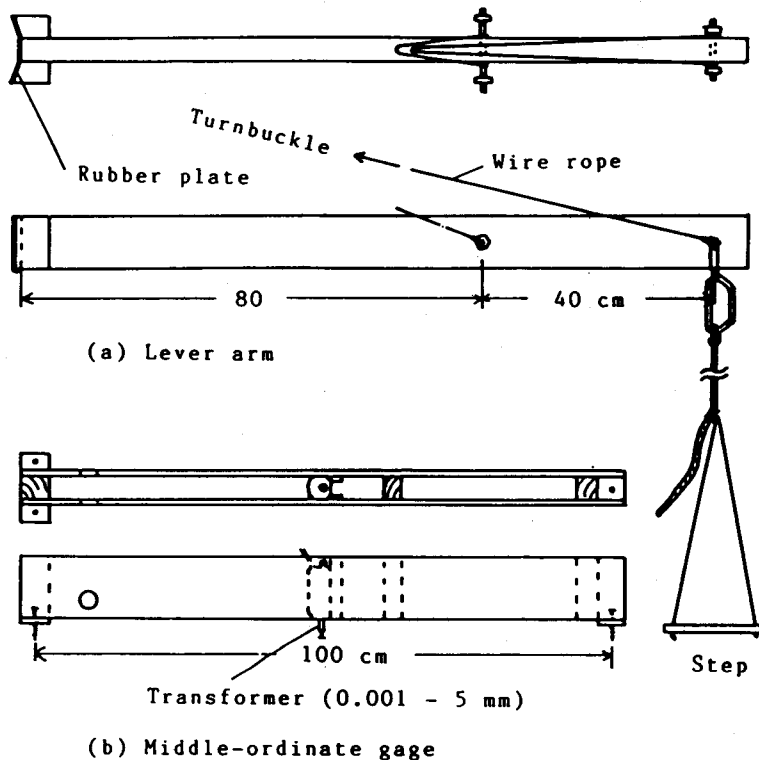


Fig. 3.1 Instrument for the tree-bending test⁷⁶⁾.

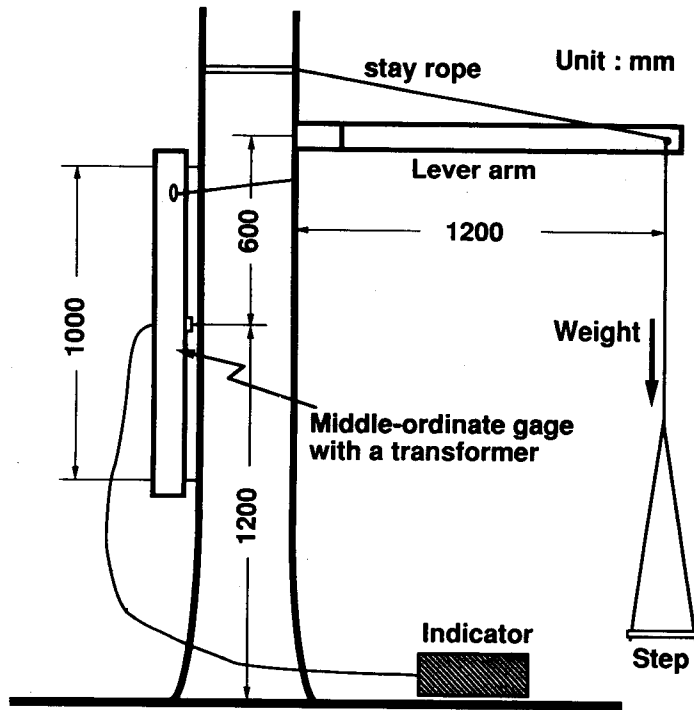


Fig. 3.2 Setup of the tree-bending test to evaluate modulus of elasticity of a tree trunk.

加力梃子と矢高測定器を示す。

(3) 負荷は試験者が载荷ボルトから吊り下げたアブミに乗ることによって、樹幹に梃子の突き付け部から地面まで一様な曲げモーメントを生じさせる (Fig. 3.2, Photo. 3.1)。矢高の測定に際しては、荷重除去後の残留変位に注意し、これが大きいと判断される場合は測定を繰り返すなどして、測定変位の再現性に留意する。測定は樹幹の直角2方向について行ない、それぞれについて樹幹ヤング係数を算出し、その平均を代表値とする。

(4) 樹幹ヤング係数は、下記の式 (3.1) を用いて計算する。

$$E_s = \frac{s^2 M}{2\pi\delta(r_{120} - t_b)^2} \quad (3.1)$$

ここに、 s ：矢高測定区間長、 M ：負荷モーメント＝試験者の体重(W) $\times(L+r_{180})$ ； L ：梃子の長さ、 r_{120} 及び r_{180} ：地上高 120 cm 及び 180 cm における周囲長から求めた樹皮付き半径、 t_b ：平均樹皮厚、 δ ：測定した矢高。

なお、供試木一本当りにかかる時間は、無風時で約 5 分程度である。

また、樹幹ヤング係数の計算に際する問題としては、供試木の樹幹形状、樹幹のテーパ効果による剪断付加撓み、自重による付加モーメント等の影響が挙げられるが、これらによる

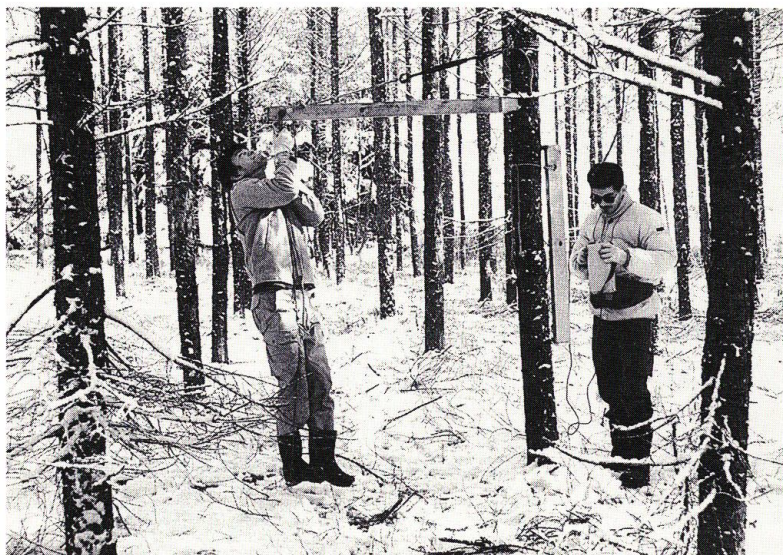


Photo. 3.1 The load application.

測定誤差は数%であることが報告されており⁷⁶⁾、利用上支障はないものと考えられる。

3.2 丸太ヤング係数と樹幹ヤング係数

本研究では、丸太の状態測定したヤング係数（以下丸太ヤング係数と呼ぶ）を樹幹ヤング係数の一種として材質指標に用いた。丸太ヤング係数は立木段階で測定される樹幹ヤング係数と同様、丸太の曲げ変形から求められる数値で、両者の間の相関は大きいことが報告されている⁷⁶⁾。また、比較的簡便に行なうことができることから、すでにスギ、ヒノキ精英樹候補木の材質評価に一部用いられており^{77,78)}、今後は材質評価の一方法として確立される可能性が大きい。

丸太の曲げ試験を行なう際、荷重方法やスパンは適宜変えることができるが、丸太ヤング係数を樹幹ヤング係数と同等に扱う場合、矢高測定区間における剪断付加撓みをできる限り小さくするよう心掛ける必要がある。小泉⁷⁹⁾は、中央集中荷重方式でスパン中央の撓みから丸太ヤング係数を計算する場合、丸太のテーパ率が大きくなるとテーパ影響も考慮する必要があることを指摘している。一方、2点荷重方式で等モーメント区間の曲げ変形からヤング係数を算出する場合は、テーパ効果による剪断付加撓みは全く無視しう程度であるとしており、本研究ではこれらの結果を考慮した上で2点荷重方式を採用することにした。

また、近年打撃法によって丸太材の動的ヤング率を求める方法も開発されており、打撃音からヤング係数を推定する方法⁸⁰⁾は、スギ、ヒノキの小径木に対して、弾性波の伝播速度から曲げヤング係数を推定する方法⁸¹⁾、ヒノキに対してそれぞれ試みられており、いずれも有効な測定方法であることが示されている。

第4章 丸太ヤング係数と諸形質との相互関係

本章では、材質指標としての樹幹ヤング係数の有用性を調査する目的で、生材状態の丸太のヤング係数と胸高直径、年輪幅、晩材率及び容積密度数との関係を明らかにした結果について述べる。

4.1 実験

4.1.1 供試木

供試木は、北海道枝幸郡旭川営林支局枝幸事業区に設定されたカラマツ産地試験林から入手した。同林は1959年に設定されたもので、植栽面積5.15 ha、初期植栽密度は1.8 m×1.8 m、これまでに50%の定量間伐が一度実施されている。同林から、見かけ上曲がり等の欠点が少ないものを144本を伐採し、材長約4.0 m（地上高0.3 m～4.3 m部分）の1番丸太を入手した。なお、根元曲がりがある個体は、適宜造材時に追上げを行なった。供試林分及び供試木の概要をTable 4.1に示す。

Table 4.1 Outlines of sample stand

Location	Established year	Tested year	Number of logs	Diameter at breast height(cm)		
				Ave.	Max.	Min.
Esashi	1959	1990	144	21.6	27.2	16.9

4.1.2 測定形質と測定部位

実験は以下に示す手順で行なった。まず生材状態での丸太のヤング係数（以下この値を丸太ヤング係数： E_{\log} と呼ぶ）を測定した後、丸太の地上高120 cmにあたる部位から容積密度数と年輪幅及び晩材率測定用の円盤（厚さ各10 cm）を採取した。

4.1.3 実験方法

(1) 丸太ヤング係数の測定

試験方法をFig. 4.1に示す。試験条件は、支点間350 cm、荷重点間120 cmの対称2点荷重方式（荷重は体重载荷）で、荷重点間の中央100 cm区間の変位を1/1000 mm精度、5 mmストロークの角型ゲージセンサーを用いて測定し、次式(4.1)を用いて丸太ヤング係数を計算した。

$$E_{\log} = \frac{287500 \cdot W}{\pi \delta (r_{\text{center}} - t_b)^4} \quad (4.1)$$

ここに、 W ：試験者2名の合計体重、 δ ：測定した区間変位、 r_{center} ：支点間中央部の半径、 t_b ：平均樹皮厚。

(2) 容積密度数と年輪幅の測定

容積密度数と年輪幅の測定は以下のように行なった。

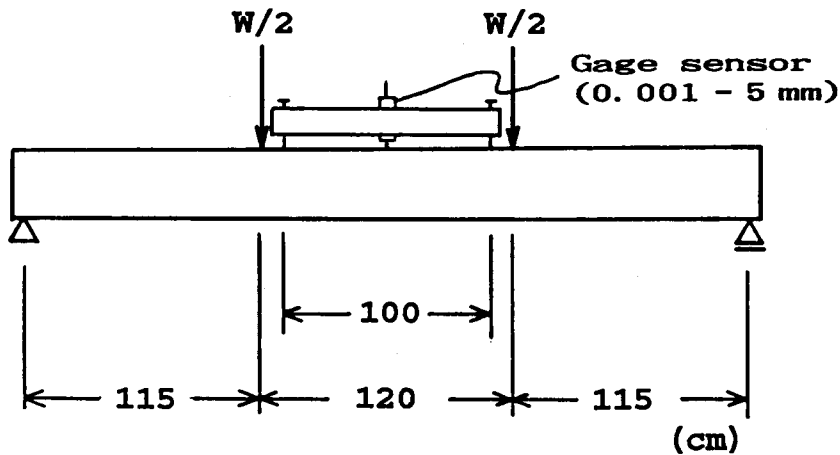


Fig. 4.1 Bending test for a long specimen.

まず厚さ約 10 cm の円盤から長径と短径を含むように髓を含む幅 4 cm, 厚さ 4 cm のスティックを作製した。その後、両径について樹皮側から 10 年輪を境界としてその内側の材部と外側の材部に分け、それぞれについて容積密度数と平均年輪幅を測定した。以後の解析においては、樹皮側から 10 年輪を辺縁部、その内側を樹心部と呼び、両径での平均をそれぞれの代表値とした。辺縁部と樹心部は、それぞれ成熟材、未成熟材を多く含む材部と考えられる。

(3) 晩材率の測定

晩材率の測定方法は以下の方法によった。

年輪幅測定用の円盤と連続する厚さ 10 cm の円盤の長径から、髓を含む幅 4 cm, 厚さ 4 cm のスティックを作製し、表面をプレーナーで仕上げた後、30 倍の拡大ルーペ(最小読み取り精度 0.05 mm)を用いて、木口面から直接早晚材境界を細胞壁厚の差から読み取った。測定は 2 方向について行ない、それぞれの方向について樹皮側から 10 年輪とその内側に分け、2 方向の平均値を両部材の晩材率とした。

なお、胸高直径は丸太の地上高 120 cm 部位における周囲長から算出した。

4.2 結果と考察

試験結果を Table 4.2 に一括して示す。道内の 5 箇所の間伐木を用いて本試験とほぼ同様の試験を行なった報告¹⁵⁾と比較すると、容積密度数では樹心部、辺縁部とも士別産より小さいものの、北見、木古内、浦河及び静内産より大きく、年輪幅は両材部とも他の 5 産地より狭かった。また、容積密度数に関して両部材で平均した値を苫小牧地方演習林と虻田産の試験結果^{11,14,79)}と比較すると、虻田産よりやや小さく、苫小牧産よりやや大きかった。

各形質間の相関係数を Table 4.3 に一括して示す。

丸太ヤング係数と、晩材率及び容積密度数の間には両材部において 1%水準で有意な相関が得られた。特に、辺縁部の両形質との相関は高かったが、これは丸太ヤング係数が曲げ変形

Table 4.2 The basic properties of test materials

Items	Log MOE (GPa)	DBH (cm)	Corewood			Outerwood		
			ARW (mm)	PLW (%)	BD (kg/m ³)	ARW (mm)	PLW (%)	BD (kg/m ³)
Ave.	11.9	21.6	5.0	23.6	418.7	2.3	38.6	451.3
Max.	16.6	27.2	7.0	32.5	502.2	3.7	51.5	559.4
Min.	7.5	16.9	3.4	17.0	349.9	1.4	24.6	346.4
S. D.	1.6	1.7	0.6	3.5	30.9	0.4	5.0	32.2
C. V.	13.7	8.0	11.4	14.7	7.4	18.4	13.1	7.1

Legend : Log MOE : Modulus of elasticity of log. DBH : Diameter at breast height.
 ARW : Average of ring width. PLW : Percent of latewood width. BD : Basic density.
 S. D. : Standard deviation. C. V. : Coefficient of variation (%).
 Corewood : Area of inside of 10th ring from bark.
 Outerwood : Area of outside of 10th ring from bark.

Table 4.3 Correlation coefficients among variables

Variables	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1 Log MOE	1.000	-0.096	-0.156	0.239**	0.221**	-0.062	0.364**	0.551**
X2 DBH		1.000	0.467**	-0.355**	-0.169 *	0.347**	-0.280**	-0.096
X3 ARWa)			1.000	-0.192 *	-0.330**	-0.182 *		
X4 PLWa)				1.000	0.321**		0.588**	
X5 BDa)					1.000			0.620**
X7 ARWb)						1.000	-0.535**	-0.243**
X8 PLWb)							1.000	0.607**
X9 BDb)								1.000

Legend : Log MOE : Modulus of elasticity of log. DBH : Diameter at breast height.
 ARW : Average of ring width. PLW : Percent of latewood width.
 BD : Basic density.
 ** : Significant at 1% level. * : Significant at 5% level.
 a) : Values for corewood. b) : Values for outerwood.

から求められる数値であることに起因するものと考えられる。以上のように樹幹を曲げることによって得られるヤング係数は、試験体の材質、特に辺縁部の材質を顕著に反映する複合形質であることが確認された。丸木ヤング係数と胸高直径との間には相関は認められず、また両材部の年輪幅との間にも相関関係は認められなかった。これらの結果から樹幹ヤング係数と肥大生長に係る諸形質が互いに独立性の高い形質であることが示された。

胸高直径と年輪幅は両材部において正の相関関係にあった。この結果は、胸高直径が各年の年輪の積算値であることを考えると妥当なものと考えられる。また相関係数はそれぞれ、樹心部で0.467、辺縁部で0.347となっており、直径17.0~27.0 cm程度の造林木の胸高直径は生長初期の年輪幅により大きく支配されていることがわかる。

胸高直径と晩材率は、両材部で1%水準で負の相関関係が認められた。これに関連して、年輪幅と晩材率では、樹心部では5%水準、辺縁部では1%水準でいずれも負の相関が認められた。久保⁸²⁾は、針葉樹3樹種において年輪幅増加に伴う晩材幅の変化に規則性を認め、この規則性が晩材率変動の規則的なパターンを導いていることを指摘している。そこで今回の結果

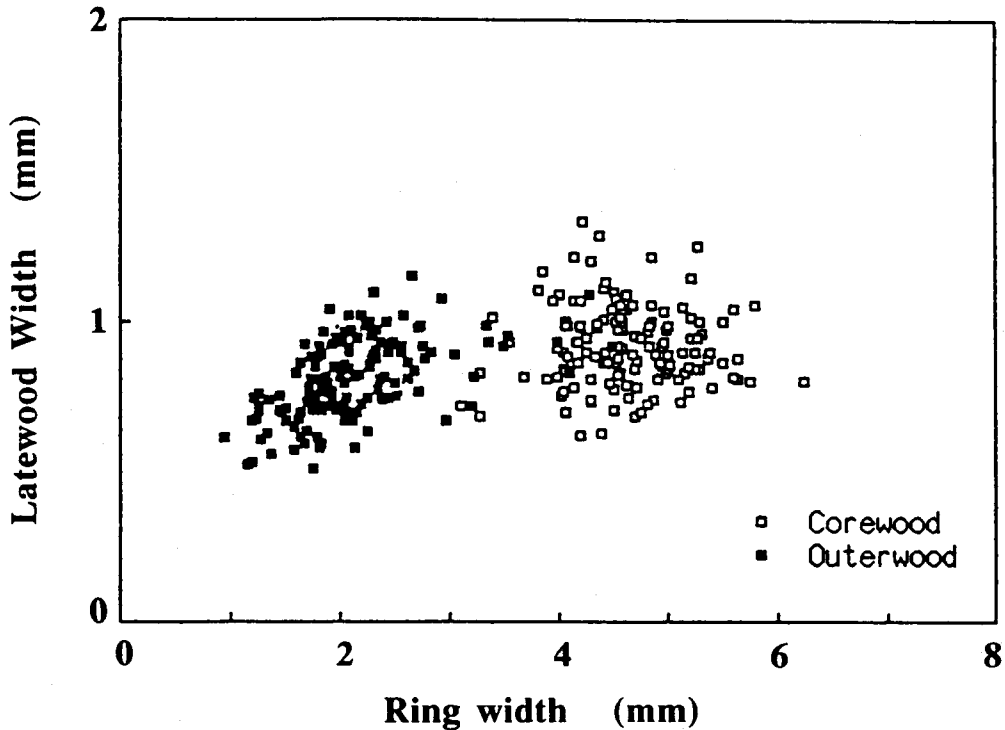


Fig. 4.2 Relationship between ring width and latewood width.

について材部別に年輪幅と晩材幅の関係を調べてみた (Fig. 4.2)。狭年輪幅領域では両者の間に直線的な関係が認められ、広年輪幅領域では晩材幅が大きくバラツキながら僅かながら減少してゆく傾向が認められる。樹心部、辺縁部それぞれで相関係数と直線回帰式を求めてみると、樹心部では相関係数は、 -0.009 と著しく低かったが、辺縁部では相関係数は 0.53 と高く (1%水準で有意)、回帰式は $Y=0.116X+0.557$ が得られた。以上のように、カラマツにおいても年輪幅増加に伴う晩材幅の変化に規則性が認められ、これが材部別の年輪幅と晩材率の関係を導いていると考えられた。

平均年輪幅と容積密度数は、両材部で1%水準で負の相関が認められた。相関係数は樹心部でのそれがやや大きかった。また、晩材率と容積密度数との相関も両材部で1%水準で有意であった。特に辺縁部では、相関係数も大きく ($r=0.61$)、同部における容積密度数に対して晩材率の寄与の割合が大きいことが示された。この結果はカラマツの高容積密度の要因は晩材率であるとする報告^{64,65)}を支持するものである。また容積密度数は、晩材部の仮道管長と高い相関関係にあることも指摘されており⁶⁾、容積密度数が晩材と密接な関係にあることは明らかである。

4.2.2 諸形質の半径方向における変異

平均年輪幅、晩材率及び容積密度数について樹心部と辺縁部の測定値を比較して半径方向

の変異を調べた。これは諸形質における未成熟-成熟相関を求めることであり、広義の遺伝相関を調べることになる。

両材部の平均年輪幅について相関を求めたところ、両者の間には5%水準で負の相関が認められた。この結果は、生長の良否が永続的でないことを示すものと考えられる。しかしながら、この生長量の変化は林内の鬱閉度などの生育環境の影響が大きいと考えられることから、この結果からその遺伝能力の大きさを指摘することは難しい。

両材部の晩材率のについて相関を求めたところ、両者の間に高い正の相関 ($r=0.59$) が認められた。この結果は、本形質における遺伝因子の寄与の割合が高いことを示している。しかしながら、前節で述べたように晩材率は広年輪幅領域と狭年輪幅領域で異なる変異パターンを有しており、一年次毎の晩材率を比較する場合、一年輪内の密度変動パターンが変わると相関関係が異なってくることが予想される。野堀ら⁶⁵⁾の報告によれば、20年生時の晩材率と各年次のそれとの相関を求めたところ、14年生時以前にさかのぼると有意な相関が認められなくなるとしており、この場合14年目が変異パターンの移行年度と考えることができるだろう。

容積密度数に関して両材部間の相関を求めたところ、両者の間には1%水準で正の相関が認められた。この結果から、容積密度数においても晩材率と同じく遺伝因子の寄与の割合が高いことが推察された。最小二乗法によって求めた原点を通る直線の傾きは1.08で、前述の道内5ヶ所のカラマツ造林木のデータ¹⁵⁾より得られた傾き1.09(供試木数:368本, 相関係数:0.76)とはほぼ同じで、第7章で触れるクローン集植所の間伐木のデータから得られた傾き1.01(供試木本数:190本, 相関係数:0.64)よりかなり大きかった。

4.3 要約

本章では、材質指標としての樹幹ヤング係数の有用性を調査する目的で、実験を行なった。実験では樹幹ヤング係数の代りに丸太ヤング係数を用い、樹心部、辺縁部それぞれの容積密度数、晩材率、年輪幅との関係を調べたほか、諸形質の半径方向の変異についても検討した。結果は以下のように要約される。

(1) 樹幹を曲げることによって得られるヤング係数は、試験体の材質、特に辺縁部の材質を顕著に反映する複合形質であることが確かめられた。また肥大生長に係る諸形質との相関が弱く、生長の良否による影響を受けない形質であることが確かめられた。

(2) 胸高直径の大小は、生長初期の年輪幅の影響が大きいことが確かめられた。また年輪幅は樹心部と辺縁部で負の関係があることから、生長量の大小は生長に伴う生育環境の変化によって大きく左右されることが予想された。

(3) スギ、ヒノキ、アカマツと同様にカラマツの場合も、年輪幅の増加に伴う晩材率の変化には規則性があり、これが年輪幅と晩材率の関係を導いていることが示唆された。

(4) 晩材率は、丸太ヤング係数、容積密度数といった材質形質とは正の相関関係にあり、胸高直径、年輪幅といった生長形質とは負の相関関係にあることがわかった。また、晩材率は遺

伝因子の寄与の割合の高い形質であることが確かめられた。

(5) 容積密度数も遺伝因子の寄与の割合は高いことが確認された。また晩材率と同様、材質形質とは正の、生長形質とは負の相関関係にあることがわかった。

以上の結果から、晩材率、容積密度数、樹幹ヤング係数はいずれも材質指標として優れていると考えられた。中でも樹幹ヤング係数は生長形質とは互いに独立性の高い形質であることから材質指標として極めて有用であると判断した。

第5章 樹幹ヤング係数の年次内変動と経年変動

本章では、肥大生長に伴う断面寸法の変化によって生じる樹幹ヤング係数の変動を把握した結果について述べる。実験の内容は、年次内の変動に関する部分と、経年的な変動に関する部分に大別される。

5.1 年次内変動

5.1.1 実験

一年次内の樹幹ヤング係数の変動を調査する目的で、札幌市西野の三菱マテリアル(株) (旧三菱鉱業セメント(株)) 社有林のカラマツ 10 本 (1976 年植栽) を対象に生立木曲げ試験を行ない樹幹ヤング係数を測定した。

試験は、1990 年 4 月下旬から同年 10 月下旬にかけて 10 回行なった。試験期間及び試験回数を設定するにあたり、以下に挙げる項目を考慮した。

- (1) 冬期間は辺材部水分が凍結するため曲げ剛性が增大すること⁸³⁾。
- (2) 北海道でのカラマツの形成層活動の再開は 4 月下旬あるいは 5 月上旬とされていること⁸⁴⁾。
- (3) 半径径と接線径との比が 1.0 以上の細胞の形成は 6 月下旬に終了し、それ以後は晩材仮道管が形成され始めること⁸⁵⁾。
- (4) 10 月下旬頃には生長期が終了し、休止期に入ること⁸⁶⁾。

5.1.2 結果と考察

Fig. 5.1 に測定期間内の直径生長の増加の様子を示す。肥大生長が盛んな時期はほぼ 5 月中旬から 8 月上旬で、9 月中旬以降はほとんどの供試木で胸高直径の変化はみられない。供試木の平均胸高直径は、測定開始日 (4 月 13 日) で 15.1 cm、測定終了日 (10 月 19 日) で 16.0 cm である。測定期間内の半径生長量は平均で 4.1 mm で、1985 年に本試験林において調査された結果 (6.4 mm)⁸³⁾ と比較すると約 3 分の 2 に減少している。また、その範囲は 2.1 mm-6.0 mm となっており、供試木間の生長差は 1985 年の測定値 (5.0 mm-8.0 mm) に比べ大きくなっている。供試木の胸高直径と半径生長量との間には相関は認められないことから、この差は各供試木の局所的な生育環境の違いから生じたものと考えられる。

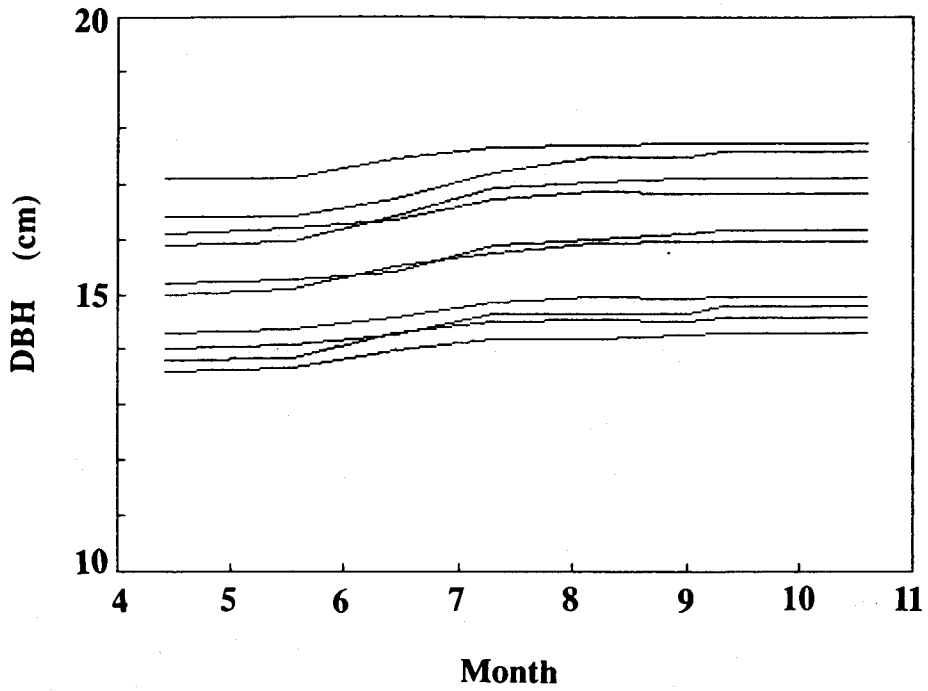


Fig. 5.1 Seasonal variation of DBH.

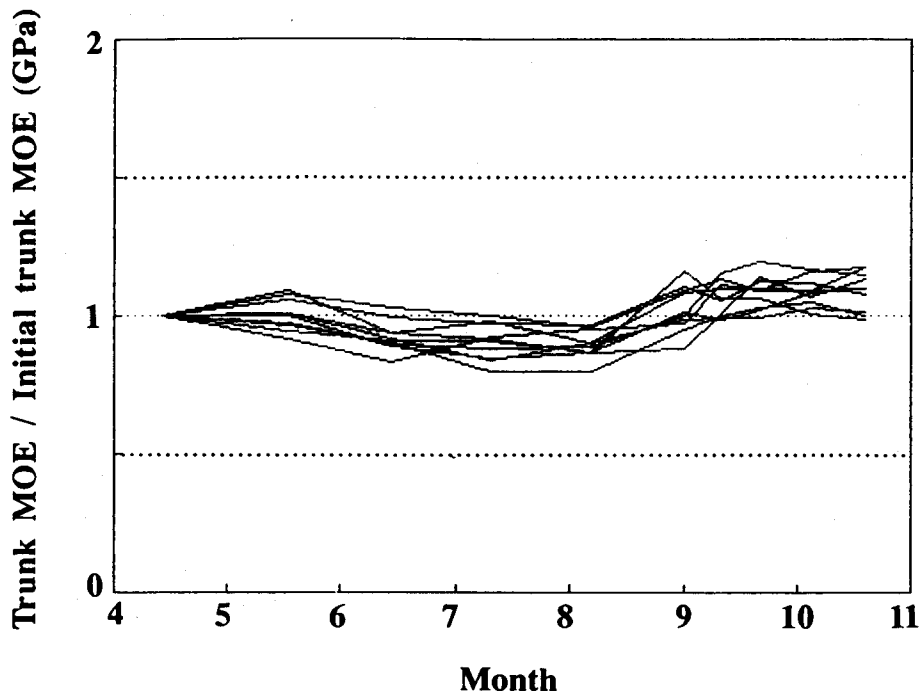


Fig. 5.2 Seasonal variation of trunk MOE.

測定期間内の樹幹ヤング係数の変動を各測定値の4月の測定値との比を用いて Fig. 5.2 に示す。樹幹ヤング係数の平均値は、測定開始日で7.21 GPa、測定終了日で7.80 GPa である。樹幹ヤング係数は、ほとんどの供試木において6月中旬から減少しはじめ8月上旬には極小値をとる。測定開始日から8月上旬までの樹幹ヤング係数の減少率は最大30.5%、最小4.3%、全供試木平均で11.5%となった。各供試木の胸高直径と増加率との間には相関はみられない。いったん減少した樹幹ヤング係数はその後急激に増加しはじめ、9月中旬以降は比較的安定してくる。測定開始日から終了日までの樹幹ヤング係数の増加率は最大17.3%、最小-6.0%で、平均では8.0%となっている。胸高直径との相関は認められない。このように樹幹ヤング係数は、半径方向生長と連動した形で変動しており、直径生長が盛んな早材部細胞形成期には徐々に減少し、晩材部細胞が形成され始めると転じて増加しはじめ、その増加は形成層活動の停止まで続く。この変動パターンは、1985年に同一林地において測定された9年生時の樹幹ヤング係数の変動⁸³⁾とほぼ一致している。しかしながら、9年生時には今回認められた樹幹ヤング係数の増加は認められていない。この原因として、始原細胞の成熟度の違いが挙げられる。鈴木⁸⁷⁾は、カラマツにおいて樹幹半径方向の連続切片の引張りヤング係数を測定した結果、早材のヤング係数は樹齢によってそれほど変化しないが、晩材のそれは樹齢とともに増加することを報告しており、20年生時の晩材ヤング係数は7年生時の約2倍になることを示した。また太田⁸⁸⁾はスギ、ヒノキを用いて樹幹内の動的ヤング係数を測定した結果、晩材のヤング係数が髓から10-15年輪目で著しく増加することを報告している。今回の測定は14年生時に行なっており、晩材ヤング係数の増加時期にあたると思われる。

以上の結果から、材質評価を目的とする樹幹ヤング係数の測定は、測定値が比較的安定する9月中旬以降に行なうのが効果的であると考えられる。また冬期間に樹幹辺材部における水分凍結の恐れがある地域では、気温の変化に注意し凍結期間の測定を避けるよう留意すべきである。

5.2 経年変動

5.2.1 実験

樹幹ヤング係数の測定は、以下の林地で行なった。

三菱マテリアル(株) 西野山林	札幌市西野
北海道大学苫小牧地方演習林 120, 123, 127, 135,	苫小牧市高丘
136, 313, 317 林班	

苫小牧演習林ではカラマツ(120, 127, 135, 136, 313 林班)の他に参考のためアカエゾマツ(123, 317 林班)を試験に供した。

試験は西野では1987~1991年の各年に、苫小牧演習林では1986年及び1989~1991年にいずれも9月下旬以降に行なった。供試木本数は、試験開始年はカラマツ57本、アカエゾマツ20本としたが、その後の間伐や野鼠害等のため減少し、1991年現在の本数はカラマツ41本、アカ

エゾマツ 17 本である。

1991 年現在の供試木の概要を Table 5.1 に示す。

5.2.2 結果と考察

西野試験地における樹幹ヤング係数の経年変化を平均値と標準偏差を用いて Fig. 5.3 に示す。平均樹幹ヤング係数は、1987 年から 1989 年まではほぼ横ばいで 1989 年から 1990 年にかけては約 0.5 GPa、1990 年から 1991 年にかけては 1.6 GPa 増加している。これらの増加を前年の樹幹ヤング係数との比でみると、1989 年から 1990 年にかけては約 7%、1990 年から 1991 年

Table 5.1 Details of the sample trees at two stands as of 1991

Locations	Cpt. No.	Species	Established years	Number of sample trees	Ave. DBH (cm)	Ave. MOE (GPa)
Tomakomai	120	Larix	1960	6 (10)	20.8	9.33
	127	Larix	1958	9 (10)	20.0	9.92
	135	Larix	1959	10 (10)	21.9	9.45
	136	Larix	1952	6 (6)	22.2	9.38
	313	Larix	1958	10 (10)	18.5	8.68
	123	Picea	1954	10 (10)	20.2	8.37
	317	Picea	1942	7 (10)	19.8	8.34
Nishino	—	Larix	1976	10 (11)	16.9	9.14

Note : Data in parentheses are the number of sample trees at the first testing year.

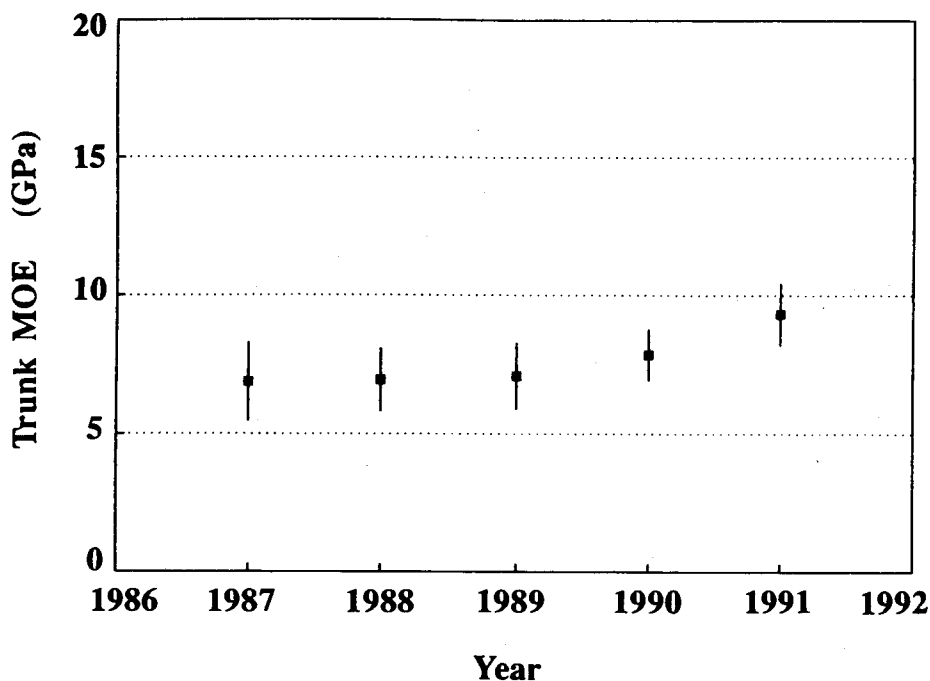


Fig. 5.3 Variation of the trunk MOE in Nishino stand.

Table 5.2 Correlation coefficients of trunk MOE in Nishino stand

Years	1987	1988	1989	1990	1991
1987	1.00	0.89**	0.93**	0.79 *	0.91**
1988		1.00	0.93**	0.95**	0.90**
1989			1.00	0.89**	0.90**
1990				1.00	0.82 *
1991					1.00

Legend : ** : Significant at 1% level.
* : Significant at 5% level.

Table 5.3 Correlation coefficients of trunk MOE of *Larix leptolepis* in Tomakomai stand

Years	1986	1989	1990	1991
1986	1.00	0.68 *	0.71 *	0.82 *
1989		1.00	0.92**	0.87 *
1990			1.00	0.89 *
1991				1.00

Legend : ** : Significant at 1% level.
* : Significant at 5% level.

にかけては22%の増加率となる。石田ら⁸⁹⁾はカラマツの未成熟期から成熟期への移行を樹齢15~20年としており、今回の供試木が1991年で15年生であることを考えると、これらの樹幹ヤング係数の増加は個体の成熟に伴う晩材部ヤング係数の増加によるものと考えられる。Table 5.2は、樹幹ヤング係数における各年の測定値間の相関を調べた結果である。ここ2年間の大規模な樹幹ヤング係数の変動にも関わらず各年の測定値間の相関は高く、これらは樹幹ヤング係数の再現性の良さを示すものであろう。

Table 5.4 Correlation coefficients of trunk MOE of *Picea glehnii* in Tomakomai stand

Years	1986	1989	1990	1991
1986	1.00	0.55	0.79 *	0.78 *
1989		1.00	0.75 *	0.63
1990			1.00	0.93**
1991				1.00

Legend : ** : Significant at 1% level.
* : Significant at 5% level.

Fig. 5.4は、苫小牧試験地において測定した樹幹ヤング係数の経年変動を各年度の平均値と標準偏差を用いて表したものである。図中の直線は、各年度の樹幹ヤング係数の平均値について最小二乗法によって求められた回帰直線である。各林班における樹幹ヤング係数の年増加率の範囲は、2~4%と林班によってやや異なるが、同一林班内の年増加率はほぼ一定していた。これらの増加率に関して樹種による特性は認められなかった。また、各林班の樹幹ヤング係数の増加率と樹幹ヤング係数測定期間中の胸高直径の増加率の間には相関関係は認められなかった。これらの結果は、両形質が各林班で独立的に変動していることを示すものとして興味深い。

同一個体における樹幹ヤング係数の再現性を検討するために、カラマツについては127林班、アカエゾマツについては123林班を例にとり、各年の測定値間の相関を調べた。結果をTable 5.3及びTable 5.4に示す。両樹種ともに測定値間の相関は高く、樹齢30年を超えた供試木においても樹幹ヤング係数の再現性が良いことが示された。

5.3 要約

本章では、肥大生長に伴う断面寸法の変化によって生じる樹幹ヤング係数の変動を1年次内の変動と経年的な変動に分けて検討した。得られた結果は以下のように要約できる。

- (1) 1年次内の樹幹ヤング係数は形成層の活動期間中変動することが確認された。すなわち、

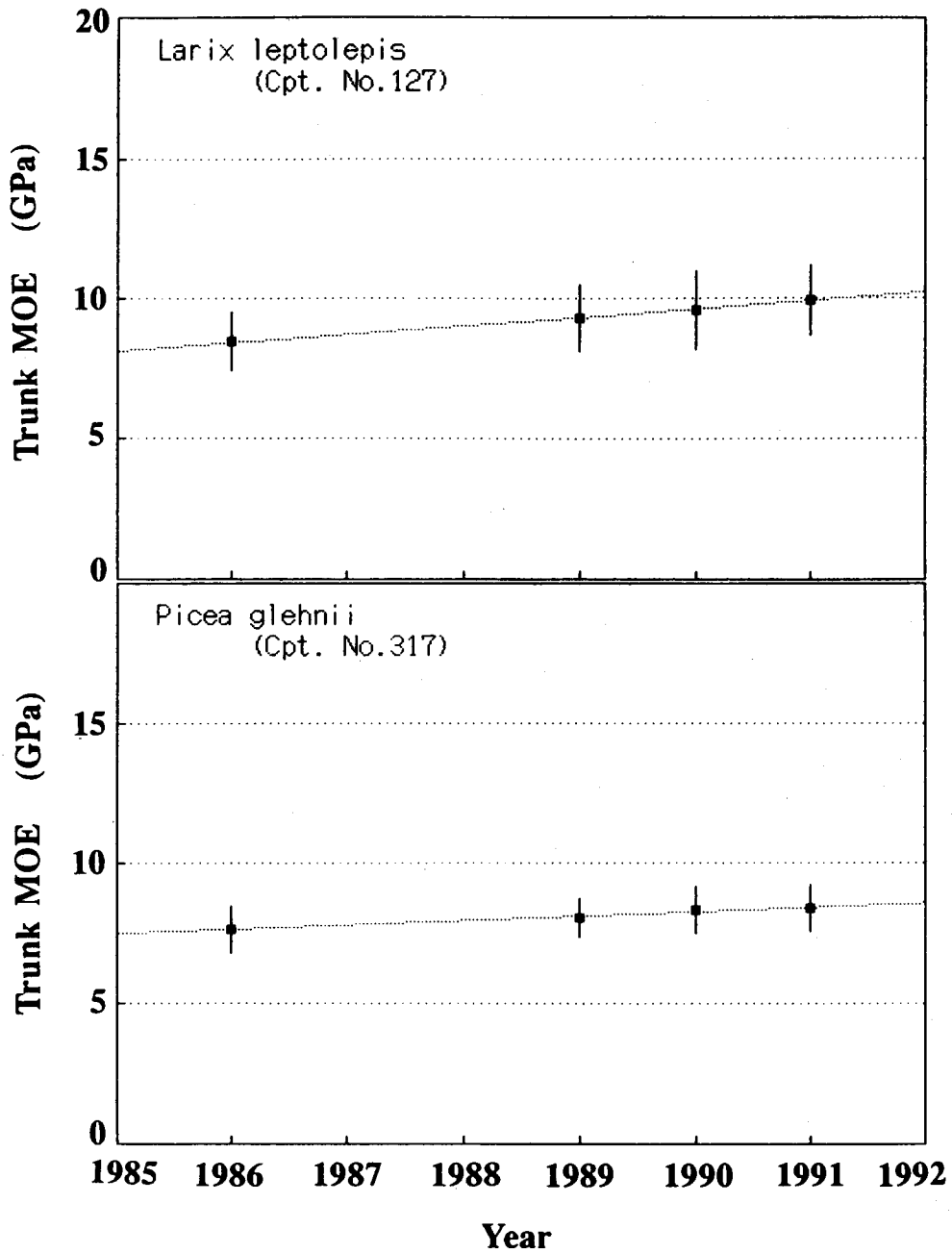


Fig. 5.4 Variation of the trunk MOE in Tomakomai stand.

早材部細胞形成に伴い減少しはじめ、この減少は晩材部細胞が形成されるまで続く。その後、晩材部細胞が形成されはじめると、一転して増加しはじめ、安定するのは9月中旬以降になる。

(2) これらの結果から、材質評価を目的とする樹幹ヤング係数の測定は、測定値が安定する9月中旬以降に行なうのが効果的であると考えられた。しかしながら、冬期間に樹幹辺材部における水分凍結の恐れがある地域では、気温の変化に注意し、凍結期間の測定を避けるよう留意する必要がある。

(3) 樹幹ヤング係数は樹齢15年前後で急激に増加し、30年以降は同一林分内の増加率は2~4%の間で安定することがわかった。この変動は、始原細胞の成熟に伴う晩材部細胞の強度的性質の変化によるものと考えられる。

(4) 経年測定の結果、各個体で測定される樹幹ヤング係数の再現性は高く、樹幹ヤング係数の材質指標としての有用性が示された。

第6章 樹幹ヤング係数の林地内変動

本章では、同一林分内における樹幹ヤング係数の変動特性を胸高直径等の生長形質の変動と関連付けて調査した結果について述べる。

6.1 実験

実験は苫小牧地方演習林演習林において1990年に行なった。対象樹種は、カラマツ、アカエゾマツ及びトドマツの3樹種とした。測定項目は、樹幹ヤング係数、胸高直径及び樹高の3形質とした。樹幹ヤング係数は生立木曲げ試験によって求め、胸高直径は樹幹ヤング係数測定時に求めた地上高120cm部位の周囲長から算出した。また樹高はブルーメライスによって測定した。供試木は測定値に偏りが生じないように、林地内の任意の場所に80本程度の立木が含まれる試験区を設定し、試験区内に含まれる全ての個体を対象とした。

実験を行なった林分と供試木の概要をTable 6.1に示す。

Table 6.1 Data on compartments and sample trees

Species	Cpt. No.	Age	Number of sample trees	Trunk MOE		DBH		Height	
				Ave.(GPa)	C.V.(%)	Ave.(cm)	C.V.(%)	Ave.(m)	C.V.(%)
<i>L. leptolepis</i>	313	33	80	8.86	14.3	19.5	15.2	11.7	8.7
<i>A. sachalinensis</i>	311	48	85	10.89	10.2	17.8	18.9	12.4	10.3
<i>P. glehnii</i>	317	49	83	7.83	16.4	21.7	14.3	12.3	8.2

Legend : Ave. : Average. C.V. : Coefficients of variation.

6.2 結果と考察

実験に供した3樹種における各形質のパラツキを比較すると、カラマツおよびトドマツでは胸高直径の変動係数が最も大きく、ついで樹幹ヤング係数、樹高の順になり、アカエゾマツでは、樹幹ヤング係数の変動係数が最も大きく、ついで胸高直径、樹高の順に小さくなった。

Table 6.2 Correlation coefficients among three variables in three species

Variables	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
L. leptolepis	X1 Trunk MOE	1.000	-0.110	0.043					
	X2 DBH		1.000	0.579**					
	X3 Height			1.000					
A. sachalinensis	X4 Trunk MOE			1.000	-0.288**	-0.154			
	X5 DBH				1.000	0.796**			
	X6 Height					1.000			
P. glehnii	X7 Trunk MOE						1.000	-0.507**	-0.278 *
	X8 DBH							1.000	0.668**
	X9 Height								1.000

Legend : ** : Significant at 1% level. * : Significant at 5% level.

各樹種の樹幹ヤング係数のバラツキを比較すると、トドマツの変動係数が最も小さく、ついでカラマツ、アカエゾマツの順となった。これらのうち、カラマツにおける変動係数の値は他の20年生以上の林分で測定したそれぞれの変動係数⁷⁶⁾とほぼ同じであり、本樹種の林分内のバラツキは変動係数で14~15%の範囲と考えてよいだろう。

3樹種における測定3形質間の相関関係をTable 6.2に一括して示す。カラマツについては樹幹ヤング係数と胸高直径の間に相関が認められず、最小二乗法によって求められた回帰直線の傾きは0.043とほぼ0に近かった(Fig. 6.1(A))。また、樹幹ヤング係数の散布の特徴としては次の2点を挙げる事ができる。第一に、樹幹ヤング係数の小さい個体は胸高直径の全範囲において認められ、それらの値はほぼ一定であること、第二に、胸高直径の分布範囲において平均的な生長を示している領域の樹幹ヤング係数の分布範囲が、樹幹ヤング係数の林分内変動の範囲とほぼ一致することである。一方アカエゾマツ、トドマツでは、樹幹ヤング係数と胸高直径の間に1%の有意水準で相関が認められた(Fig. 6.1(B)及び(C))。回帰直線の傾きはいずれの樹種においても負であり、肥大生長の良い個体では力学的な性質が劣るという結果となった。また、樹高と樹幹ヤング係数の関係を調べたところ、アカエゾマツにおいて5%水準で相関が認められるが、他の2樹種では有意な相関はなかった。これらの結果から、力学的性質に係る形質と生長形質の関係は樹種毎に特性をもつものと考えられる。すなわち、アカエゾマツ及びトドマツでは負の相関関係にあり、カラマツでは両者が独立的な形質であると言える。

胸高直径と樹高の関係を樹種毎に調べたところ、全ての樹種で両者の間に1%水準で有意な相関が認められた。これに関連して、各樹種の形状比(樹高÷胸高直径)をTable 6.3に示す。トドマツの形状比は平均で0.71と他の2樹種に比べ約20%程度大きかった。またその範囲も

Table 6.3 Stem form of three species

Species	Ave.	C.V.	Min.	Max.
L. leptolepis	0.607	12.7	0.451	0.805
A. Sachalinensis	0.710	12.7	0.494	0.936
P. glehnii	0.578	11.4	0.472	0.780

Legend : Ave. : Average. C.V. : Coefficients of Variation. Max. : Maximum. Min : Minimum.

Stem form : Tree height (m)/Diameter at breast height (cm).

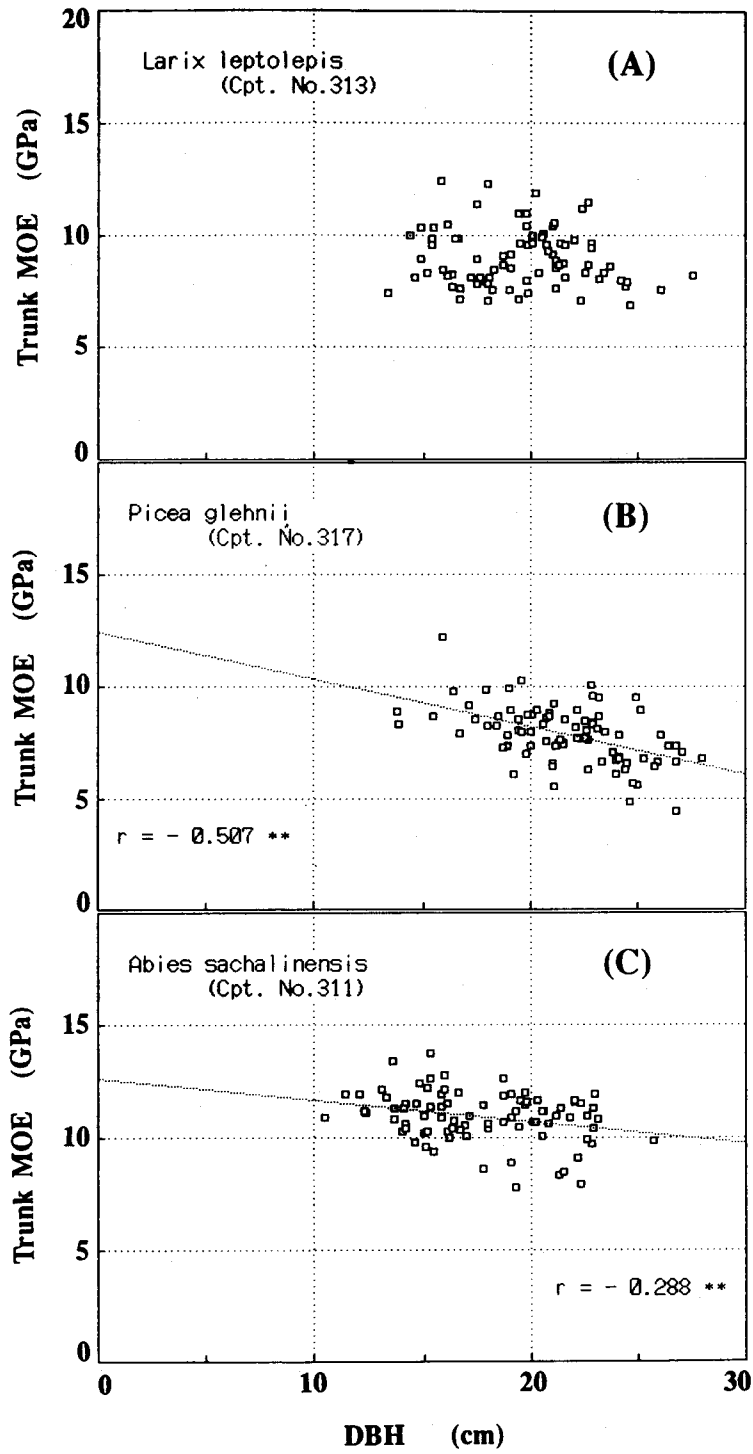


Fig. 6.1 Relationship between DBH and trunk MOE within a compartment.

広く、最大値は1.00に近い値となっている。小泉ら⁷⁴⁾は、樹幹ヤング係数の測定において、形状比と付加撓み率が直線的な相関関係にあることから、形状比の大きな個体では付加撓み率の増加に留意することを指摘している。付加撓み率は樹冠の状態によっても大きく変化すると考えられるが、トドマツに対して樹幹ヤング係数の測定を行なう場合その形状比にも注意する必要があると考えられる。

6.3 要約

本章では、カラマツ、アカエゾマツ、トドマツの3樹種について林地内における樹幹ヤング係数の変動を調べその特性を検討した。結果は以下のように要約できる。

(1) 樹幹ヤング係数の林分内のバラツキはアカエゾマツが最も大きく、ついでカラマツ、トドマツに順となった。これらのうち、カラマツについては林分内のバラツキは、変動係数では15%前後とみなしてよい。

(2) アカエゾマツおよびトドマツでは、胸高直径と樹幹ヤング係数の間に1%水準で負の相関が認められた。すなわち、肥大生長の良いものでは力学的な性質が劣る傾向があった。一方カラマツでは、両者に相関が認められず、互いに独立性の高い形質であることが確認された。

(3) カラマツの樹幹ヤング係数の林分内変動の特徴としては、胸高直径の大小に関わらず一定の下限値が存在すること、林分内の平均的な生長を示している個体群の樹幹ヤング係数の分布範囲が樹幹ヤング係数の林分内変動の範囲とほぼ一致することの2点を挙げるができる。

(4) 供試3樹種の形状比を比較した結果、トドマツが最も大きい値となった。樹幹ヤング係数の測定に際しては、形状比の大きなものは付加撓みの影響が大きくなることから、今後のトドマツに対する試験では形状比に注意する必要があると考えられた。

第7章 カラマツ産地試験林における樹幹ヤング係数

第二章で述べたように、カラマツ天然集団の変異性や遺伝特性に関する調査・研究の多くは生長・形態形質に関するもので、材質形質に関するものは質量共に十分とは言えない。そこで本章では、カラマツ産地試験林において、胸高直径、年輪幅といった生長形質と共に樹幹ヤング係数、容積密度数、晩材率といった材質形質の種子産地内・間のバラツキを調査し、樹幹ヤング係数については異なる植栽環境における再現性について検討した結果について述べる。

7.1 供試林と実験方法

実験は北海道に設定されたカラマツ産地試験林3ヵ所で行った。この試験林は、W. Langnerの発案によってカラマツ天然分布域内の30産地 (Fig. 7.1) のカラマツについて世界13ヶ国においてほぼ同時期に開始された国際的規模の試験である²¹⁾。Table 7.1に本報に用いた試験林の概要を示す。北見枝幸及び十勝清水試験林の試験区の配置は、3ブロックの三重格子法で、1ブロックは25プロット、1プロット当り126本植栽されている。Fig. 7.2に枝幸試験

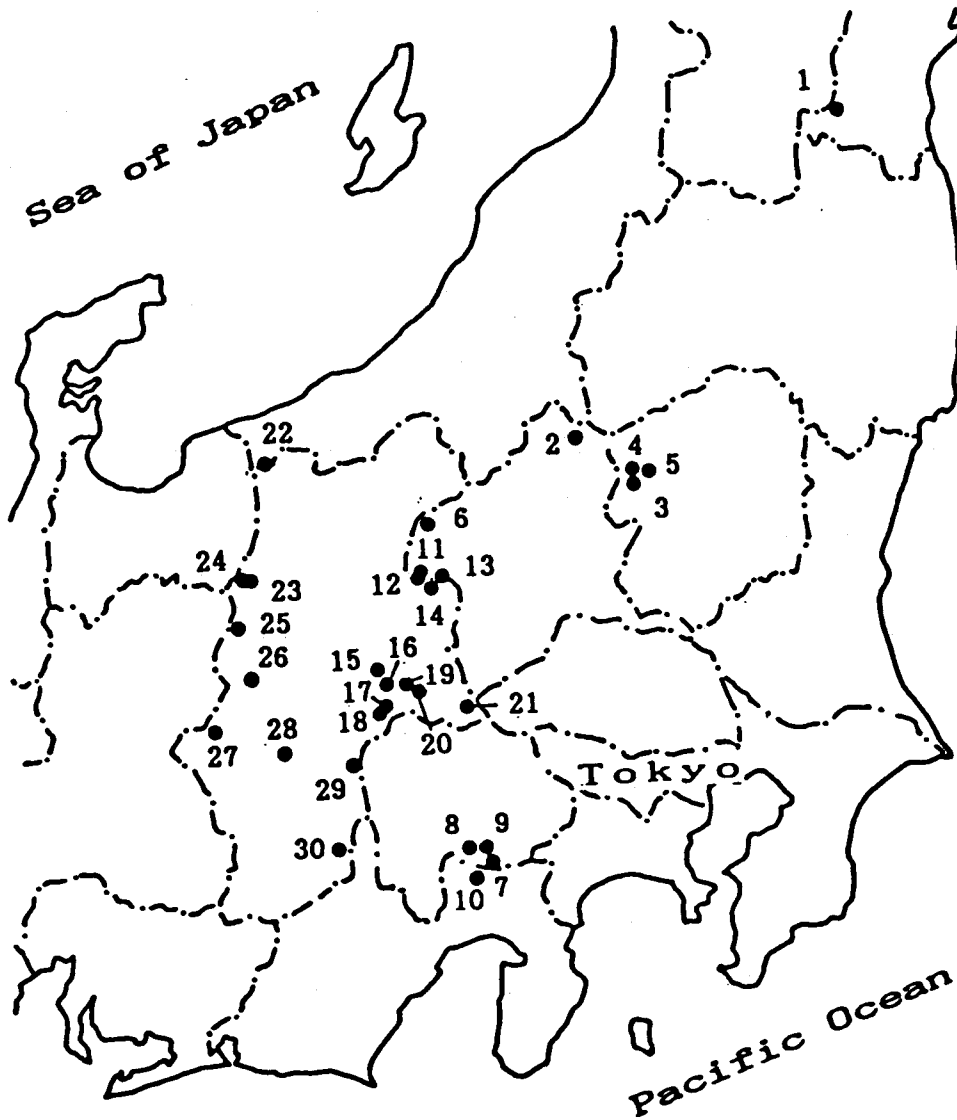


Fig. 7.1 Location and number of registered provenances. (See Table 7.2)

Table 7.1 Outlines of sample stands

Locations	Established years	Stand ages	Number of tested provenances	Number of tested trees
Esashi	1959	31	24	146
Shimizu	1960	30	19	113
Nopporo	1959	31	14	57

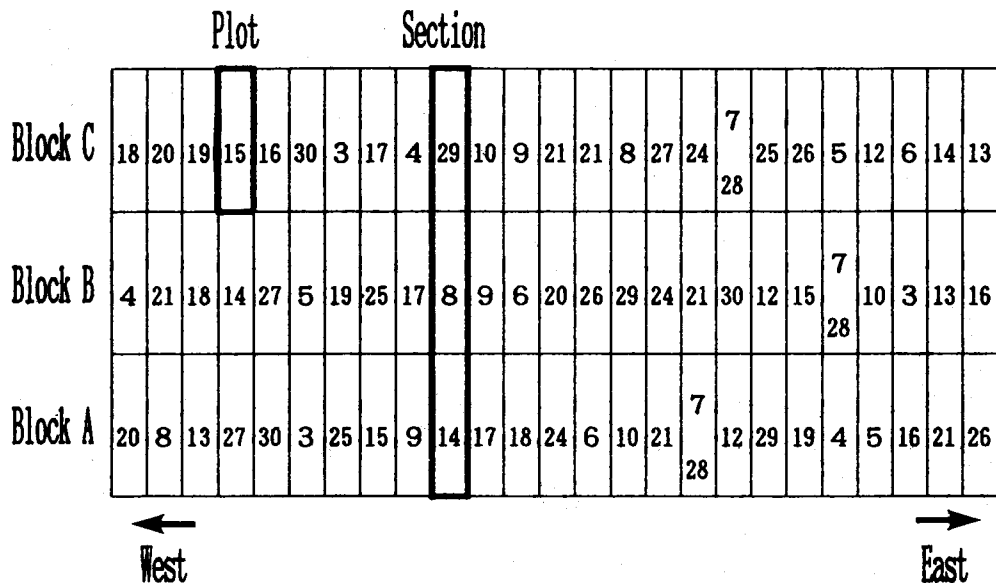


Fig. 7.2 Distribution of plots in Esashi trial stand.

林における試験区の配置を示す。しかし、産地によっては養苗数が不足したため、両試験林に共通に植栽されている産地数は19である³⁵⁾。

北見枝幸試験林では、25産地中、残存本数が十分であった24産地を対象として、1産地につき立木状態で6本(B, Cブロック各3本)を、十勝清水試験林では19産地を対象に、1産地につき立木状態で6本(A, B, Cブロック各2本)を実験に供した。野幌試験林は、27産地が植栽されているが繰り返しはなく、初期植栽本数が1産地当たり28本と少ないため、残存本数が十分であった14産地についてのみ実験を行った。

実験は上記の供試木に対して立木状態で胸高周囲長と樹幹ヤング係数を測定した。さらに北見枝幸試験林では、樹幹ヤング係数を測定した個体とは別の個体を一産地につき6本(A, B, Cブロック各2本)伐採し、丸太ヤング係数を測定すると共に丸太の地上高120 cmにあたる部位から円板(厚さ約10 cm)を採取し、髓を含むスティック(幅4 cm, 厚さ4 cm)を作製後、樹皮側から約10年輪を境界としてその内側の材部と外側の材部に分け、それぞれについて平均年輪幅、容積密度数および晩材率を測定した。以後の解析に於いては、前者を樹心部、後者を辺縁部とよぶこととするが、それらはそれぞれ未成熟材部、成熟材部を多く含む部分と考えられる。

7.2 結果と考察

3ヶ所の試験林における樹幹ヤング係数の種子産地毎の平均および変動係数をTable 7.2に示す。なお、これらのデータのうち、野幌試験林での測定値はブロックの繰り返し数が不十

分なため以下の考察では参考値として扱うこととする。また、北見枝幸試験林では、立木時と丸太時に別々の個体でヤング係数を測定しており、両者の平均はそれぞれ 11.32 GPa, 11.91 GPa で、t 検定の結果、1%水準で有意差が認められた ($t_{ca1}=3.16^{**}$)。立木時の樹幹ヤング係数の測定では、樹幹を曲げることによって樹体重心が移動し、その結果付加モーメントが生じるが、付加モーメントによる撓みの全体の撓みに対する割合は、供試木の形状比 (樹高/胸高直径) や樹冠形状によって異なるものの、1割以内であることが報告されており⁷⁴⁾、今回生じた差はこの影響によるものと考えられる。そこで、北見試験地での樹幹ヤング係数として、丸太ヤング係数に 0.951 (11.32 / 11.91) を乗じて補正したものを加えて用いることとした。

また試験地平均の樹幹ヤング係数は、最大約 3.4 GPa の差が生じており、供試木の胸高直径が大きい北見枝幸試験地の樹幹ヤング係数が他の試験地より大きくなった。この結果は、植栽環境によって生長・材質共に大きく変動することを示しており、土壌、気象等の環境因子の数量化による植栽環境の評価の重要性を示唆するものであろう。

Table 7.2 Trunk MOE for tested provenances in three trial stands (See Fig. 7.1)

Prov. No.	Provenance name	Esashi MOE (GPa)		Shimizu MOE (GPa)		Noppero MOE (GPa)	
		Ave.	C.V.	Ave.	C.V.	Ave.	C.V.
3	Akanuma	12.05	13.3	7.62	15.1	— ^{a)}	—
4	Kootoku	11.74	14.6	—	—	—	—
5	Yasyubara	11.70	10.3	—	—	—	—
6	Manza	11.03	10.9	7.91	13.1	8.57	20.8
8	Tenzin Pass	11.87	12.5	9.35	15.9	7.51	6.3
9	Sangoome	11.84	10.0	9.68	6.0	9.03	12.0
10	Sizuoka	10.17	21.0	8.31	13.1	8.31	16.2
12	Lower Mizunoto	11.13	15.9	8.00	8.0	—	—
13	Kutukake	11.56	15.0	8.52	8.2	7.90	17.9
14	Oiwake	11.14	10.0	—	—	—	—
15	Tadesina	11.20	14.0	8.23	14.6	8.17	9.4
16	Toyohira	11.60	9.8	9.09	8.2	—	—
17	Upper Tatusawa	11.92	9.4	8.94	12.7	7.79	10.5
18	Lower Tatusawa	11.26	7.5	8.89	9.0	8.12	13.5
19	Inago	11.11	15.0	8.64	9.3	7.89	8.2
20	Uminokuti	11.49	12.7	9.23	16.2	7.58	7.6
21	Mt. Kobusidake	11.69	11.7	9.61	8.5	7.66	9.9
24	Lower Takasegawa	10.12	10.8	8.32	8.1	—	—
25	Kamikooti	12.20	5.0	—	—	—	—
26	Mt. Hatimoriyama	11.32	13.8	7.91	9.4	7.46	13.3
27	Mt. Ontake	10.94	10.5	6.91	15.3	6.95	15.2
28	Mt. Kiso-komagatake	10.89	11.5	7.71	12.3	—	—
29	Mt. Kai-komagatake	10.98	14.8	7.91	12.4	8.35	13.4
30	Mt. Akaisi-oosawadake	10.56	13.7	—	—	—	—

Note : a) Untested or unprovided.

北見枝幸試験林における容積密度数, 晩材率, 胸高直径および平均年輪幅の種子産地毎の平均と変動係数を Table 7.3 に示す。当試験林においては 1990 年に森林総合研究所北海道支所によって生長・形態形質に関して毎木調査⁵⁰⁾が行なわれており, それらと本試験の結果を比較すると, 胸高直径における上位 5 産地および下位 5 産地は一部一致するものの, 全体的な傾向は異なっていた。これは本試験の供試木が樹幹ヤング係数の測定を目的としたため, 被圧木や曲がり等の欠点を有する個体を除外して選木されたためであると考えられる。また, 樹心部の平均年輪幅と当試験林の 9 年生時に行なわれた胸高直径に関する調査³⁵⁾を比較すると, 樹心部の平均年輪幅の広い種子産地のほとんどが 9 年生時の胸高直径において上位にランクされていた。

Table 7.3 Wood density, ring width and percent of latewood width for each provenances in Esashi trial stand

Prov. No.	Provenance name	E _{10g} (GPa)		DBH (cm)		BD (kg/m ³)				ARW (mm)				LP(%)			
		Ave.	C.V.	Ave.	C.V.	Corewood	Outerwood	Corewood	Outerwood	Corewood	Outerwood	Corewood	Outerwood	Ave.	C.V.		
1	Mt. Manokamidake	— ^{a)}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2	Ozegahara	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
3	Akanuma	12.8	6.1	21.8	11.8	416	8.1	453	7.0	5.2	8.6	2.1	11.4	24	13.2	37	9.7
4	Kootoku	12.9	16.5	19.9	7.9	436	7.1	479	9.8	4.4	9.5	1.9	9.3	27	7.7	39	7.8
5	Yasyuubara	11.8	11.2	22.0	3.9	413	7.0	429	7.8	4.5	13.0	2.1	18.1	22	12.0	35	10.0
6	Manza	12.1	8.2	21.7	6.1	426	5.2	453	4.4	5.0	5.8	2.2	4.1	26	11.7	41	4.4
7	Oniwa	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	Tenzin Pass	12.8	13.2	22.0	4.7	438	6.9	477	4.5	5.1	7.9	2.2	10.4	24	11.2	38	8.3
9	Sangoome	12.4	11.2	21.4	4.5	421	5.8	456	3.6	4.6	6.1	2.4	18.9	25	14.7	39	15.6
10	Sizuoka	11.0	20.9	22.3	10.4	405	5.3	430	12.3	5.1	8.2	2.3	17.4	23	21.5	36	16.4
11	Upper Mizunoto	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	Lower Mizunoto	12.5	15.2	22.1	2.8	406	8.2	446	7.5	5.1	8.5	2.2	7.5	24	10.1	40	8.9
13	Kutukake	12.7	17.4	22.6	4.5	417	7.5	442	5.5	4.7	8.9	2.8	13.5	24	7.4	36	12.6
14	Oiwake	11.4	7.1	21.5	6.1	452	6.8	470	5.7	4.7	9.3	2.4	12.8	25	7.6	38	7.7
15	Tadesina	11.8	13.6	22.1	7.9	394	8.0	430	8.4	5.2	9.4	2.3	12.1	23	15.4	39	12.3
16	Toyohira	12.0	12.0	22.4	6.4	408	9.2	462	5.3	5.5	12.3	2.1	15.5	23	13.2	41	14.1
17	Upper Tatusawa	12.2	12.4	20.2	8.5	414	5.6	459	4.0	4.6	8.6	2.1	6.1	25	12.5	41	6.6
18	Lower Tatusawa	11.5	6.5	21.2	6.5	425	6.6	465	6.4	5.1	5.3	2.4	7.2	25	20.6	40	15.5
19	Inago	11.0	11.4	22.4	12.1	404	6.6	446	6.6	4.9	7.9	2.3	30.7	23	14.3	36	14.1
20	Uminokuti	11.6	11.4	20.9	6.5	437	4.1	474	5.9	4.8	9.4	2.3	18.2	24	6.9	39	15.6
21	Mt. Kobusidake	12.3	11.6	22.1	4.4	424	5.1	452	4.0	5.2	9.9	2.1	17.2	23	16.4	40	9.8
22	Mt. Rengedake	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23	Upper Takasegawa	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
24	Lower Takasegawa	9.9	9.2	21.7	8.7	415	3.4	440	2.0	4.9	9.7	2.3	21.3	23	6.0	39	10.1
25	Kamikooti	12.6	5.2	21.5	3.6	417	4.9	472	4.4	5.2	7.8	2.0	5.8	25	12.4	43	6.2
26	Mt. Hatimoriyama	12.7	10.0	21.4	6.5	420	9.0	468	6.9	5.0	9.4	2.1	19.7	26	15.2	44	8.7
27	Mt. Ontake	11.0	12.1	20.8	6.6	420	8.8	424	3.9	5.3	15.4	2.1	12.3	21	10.7	36	12.4
28	Mt. Kiso-komagatake	12.4	8.2	21.4	7.3	408	7.2	442	5.3	5.1	4.1	2.2	13.4	23	10.5	38	12.0
29	Mt. Kai-komagatake	12.0	14.0	21.4	12.5	422	5.6	451	4.6	4.2	15.3	2.9	13.3	22	13.9	34	15.3
30	Mt. Akaisi-ooawadake	10.5	12.8	21.7	6.1	417	6.8	423	3.8	5.1	10.5	2.6	19.1	21	16.3	37	10.8
Overall averages		11.9	10.8	21.6	6.9	419	6.6	451	5.8	5.0	9.2	2.3	13.5	24	14.6	39	13.0

^{a)}: Untested or unprovided.

7.2.1 試験林地内の変異

北見枝幸試験林において測定された各形質について、ブロック別の平均と変動係数を Table 7.4 に示す。諸形質についてブロック間の差を調べる目的で t 検定を行なったところ、A-C 間ではすべての生長形質において有意差が認められた (Table 7.5)。晩材率は、C、B、A ブロックの順に小さくなっており、特に A ブロックの樹心部の晩材率が他に比べて際立って小さい値となっている。これと対応して、A ブロックの樹心部の平均年輪幅は他のブロックより広くなっており、胸高直径も大きかった。当試験地では斜面と直角方向に上側から C、B、A の順にブロックが配置され、斜面の傾斜も C ブロックから順に大きくなっており、これらの生育環境の違いが肥大生長や年輪構成に対して影響を及ぼしたものと考えられる。また樹幹ヤング係数と樹心部の容積密度数では、統計上ブロック間に有意な差は認められなかったが、斜面の上下を A、C ブロックに閉ざされている B ブロックで最も小さい値をとった。この傾向は十勝清水試験林で測定した樹幹ヤング係数でも認められており、局所的な植栽環境の差異が材質に影響を及ぼすことが明らかになった。

Table 7.4 Trunk MOE, DBH, wood density, ring width and percent of latewood width in each blocks in Esashi trial stand

Blocks ^{a)}	E _{log} (GPa)		DBH (cm)		BD (kg/m ³)				ARW (mm)				LP(%)			
					Corewood		Outerwood		Corewood		Outerwood		Corewood		Outerwood	
	Ave.	C.V.	Ave.	C.V.	Ave.	C.V.	Ave.	C.V.	Ave.	C.V.	Ave.	C.V.	Ave.	C.V.	Ave.	C.V.
A	12.1	12.8	22.4	7.6	419	7.4	450	7.5	5.1	10.6	2.4	18.0	22	13.1	37	13.2
B	11.9	15.3	21.8	6.9	413	7.4	450	8.0	4.9	10.2	2.3	17.3	24	14.7	39	13.9
C	11.7	12.5	20.8	7.6	424	7.0	455	5.6	4.9	12.6	2.2	18.1	25	11.7	40	11.2

E_{log}: Modulus of elasticity of green log. DBH: Diameter at breast height.
 BD: Basic density. ARW: Average ring width. LP: Latewood percentage.
 Ave.: Average. C.V.: Coefficient of variation.

^{a)}: The trial stand consisted of three blocks, each of which included 25 provenances.

また北見枝幸試験林での試験結果から、ブロック内の樹幹ヤング係数の変異を調べるために、1プロット内の供試木本数が5本以上ある B 及び C ブロックでプロットを単位とした分散分析を行った (Table 7.6)。樹幹ヤング係数の分散比は、B ブロックで 2.28、C ブロックで 1.98 となっており、いずれのブロックにおいてもプロット間に有意差が認められた。また、両ブロックにおけるプロット内の樹幹ヤング係数の変動係数の平均値は、B ブロック: 7.8%、C ブロック: 7.9% となっており、通常の実生林分内の変動係数: 15.0%⁹⁰⁾ に比べ小さい値であった。こ

Table 7.5 Results of t test between blocks

Factor	A-B	A-C	B-C
DBH	7.194**	5.830**	1.765
ARWa)	2.198 *	2.116 *	0.180
ARWb)	1.549	2.830**	1.395
PLWa)	3.251**	5.974**	2.210 *
PLWb)	1.290	2.297**	0.863
MOE	0.245	1.372	2.236
BDa)	0.886	0.766	1.694
BDb)	0.032	0.817	0.765

Legend: BD: Basic density. ARW: Average ring width. PLW: Percent of latewood width.
 *: Significant at 5% level. **: Significant at 1% level.
 a): Values for corewood. b): Values for outerwood.

Table 7.6 Results of one way analysis of variance for trunk MOE in block

Categories	Degrees of freedom		Variances		Fo
	Among plots	Within plots	Among plots	Within plots	
Plot(B)	23	98	4.677	2.054	2.28**
Plot(C)	23	98	3.529	1.783	1.98 *
Section ^{a)}	24	247	4.922	2.109	2.33**

Legend : Fo : Variance ratios. ** : Significant at 1% level.

* : Significant at 5% level.

Note : a) A section consists of any three adjacent plots of A, B and C blocks.

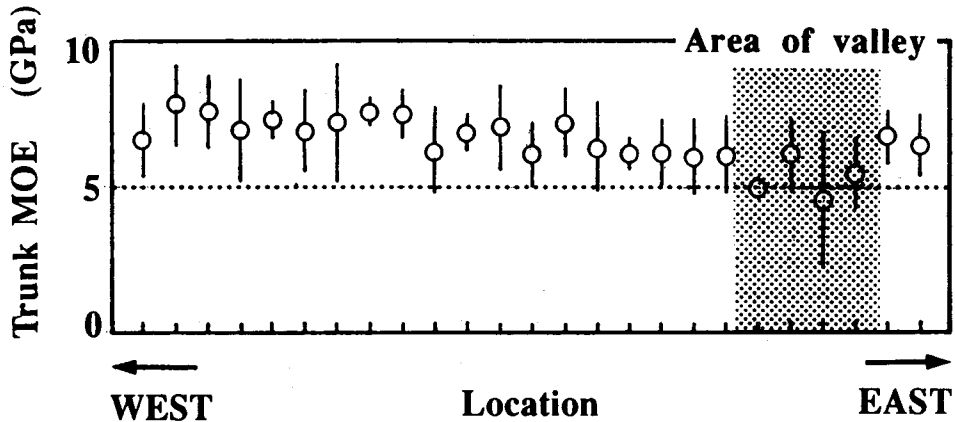


Fig. 7.3 Variation of MOE in 24 sections.

これらの結果は、各プロットがある程度まとまった一つの集団として存在していることを示すものと考えられる。一方、当試験地では中央やや東側にブロックの長手方向とほぼ垂直に比較的大きな沢が存在していた。Fig. 7.3は、A-Bブロック間およびB-Cブロック間で隣り合う3つのプロットを種子産地に関係なく結合させたセクションの平均樹幹ヤング係数と標準偏差を試験林のレイアウトに従って図示したものである (Fig. 7.2を参照)。ここでは、沢地に位置するセクションの樹幹ヤング係数が他のセクションに比べて小さい傾向が認められる。そこで、前述のセクションを単位として分散分析を行ったところ、セクション間に1%レベルで有意差が認められた (Table 7.6)。

以上の結果を総合すると、プロット間で認められた差異は種子産地に由来する差異と局所的な生育環境に由来する差異が混ざり合っていると考えることができる。

7.2.2 諸形質の産地間変異

測定形質における遺伝因子の寄与率を調べるために分散分析を行ない、種子産地内・間の分散比を比較した。結果を Table 7.7 および Table 7.8 に示す。

(A) 胸高直径と平均年輪幅

平均年輪幅は、樹心部については1%水準で、辺縁部については5%水準で有意差が認め

Table 7.7 Analyses of variance of observed values among provenances in Esashi trial stand

Fetcors	Degrees of freedom		Variances		Fo
	Among provenances	Within provenances	Among provenances	Within provenances	
DBH	23	119	2.33	3.08	0.76 NS
ARWa)	23	120	0.59	0.27	2.18 **
ARWb)	23	119	0.31	0.15	2.10 *
BDa)	23	120	937.1	955.6	0.98 NS
BDb)	23	119	1666.1	913.1	1.82 *
PLWa)	23	120	13.80	11.67	1.18 NS
PLWb)	23	120	36.86	23.13	1.59 NS

Legend : Fo : Variance ratios. BD : Basic density. ARW : Average ring width.

PLW : Percent of latewood width. NS : Not significant.

* : Significant at 5% level. ** : Significant at 1% level.

a) : Values for corewood. b) : Values for outerwood.

Table 7.8 Results of one way analysis of variance for trunk MOE among provenances in three trial stands

Trial stands	Degrees of freedom		Variances		Fo
	Among provenances	Within provenances	Among provenances	Within provenances	
Esashi	23	265	3.593	2.230	1.61 NS
Shimizu	18	94	3.277	1.169	2.80 **
Nopporo	13	43	1.187	1.514	0.78 NS

Legend : Fo : Variance ratios. NS : Not significant.

** : Significant at 1% level.

られた。一方、各年の年輪幅の積算値である胸高直径では差は認められなかった。この理由としては、以下のようなことが考えられる。初期生長の旺盛な種子産地のプロットでは、樹冠の閉鎖が他の種子産地のプロットに比べて早く進行する。その結果、個体間競争の開始が早まり、肥大生長が早期に抑制される。一方、初期生長の劣る種子産地のプロットでは、個体間競争の開始が遅く、初期生長の旺盛な種子産地のプロットに比べて生長量が減少する時期が遅くなる。この結果、両者の胸高直径には明確な差を認めることができないのであろう。すなわち、初期生長については遺伝因子の影響が大きい、その後の生長については環境因子の寄与の割合が大きくなると考えられる。これに関連して、全供試木について樹心部の平均年輪幅と辺縁部の関係を調べたところ、両者の間には5%水準で負の相関 ($r = -0.18$) が認められている。

以上の結果から、本試験林における種子産地の生長に関する評価は、環境因子の影響を比較的受けていない樹心部の平均年輪幅によって行なうことが妥当であると考えられた。しかしながら、初期生長の良好な種子産地が環境因子の影響を受けない場合に、その生長量を維持できるかどうかは不明であり、樹心部の生長から主伐期における生長量を外挿することは難しいと考えられる。

(B) 容積密度数と晩材率

容積密度数は辺縁部については有意差があるが、樹心部では差が認められなかった。種子産地内の変動係数の平均値は、辺縁部で5.8%、樹心部で6.6%となっている。これらの値は同様の試験を行なった5つの実生林分の平均値7.4%、8.0%¹⁵⁾に比べやや小さかった。樹心部と辺縁部で検定結果が異なった理由としては、以下のようなことが考えられる。まず辺縁部については樹心部に比べて平均年輪幅の範囲が狭く、年輪幅の広狭の影響が小さかったこと、また樹心部についてはあて材等の生長初期の材質のバラツキが大きい部分を多く含んでいることである。

晩材率については、両材部において有意差が認められなかった。これは同形質においてブロック間の差が大きかったことが原因と考えられる。

(C) 樹幹ヤング係数

分散分析の結果、十勝清水試験林では種子産地間に高度な有意差が認められたが、北見枝幸試験林および野幌試験林では有意な差は認められなかった。これに関連して種子産地内の変動係数の平均値を調べたところ、十勝清水試験林：11.3%、北見枝幸試験林：12.2%であった。これらの値は通常の実生林分内の変動係数：15.0%にくらべやや小さいものであった。このように試験地によって種子産地間の有意性に違いが生じた理由としては、まず試験林内の局所的な環境の違いを挙げることができる。先に述べたように、北見枝幸試験林ではブロック内での環境が一樣でなく、このことが解析精度に影響を与えたと考えられる。また第二の原因として、産地×環境の交互作用の影響を挙げることができる。すなわち、各種子産地はそれぞれの試験地において産地×環境の交互作用を受けることによってその遺伝的特性の発現に差異を生じていると考えられる。

7.2.3 トポクライン

種子採集地の緯度、経度及び海拔高と種子産地毎の諸形質の間には、いずれの組み合わせにおいても相関は認められなかった。これらの結果は、本種の遺伝的変異における明白な地理的パターンは認められないとする報告^{26,33,36,41,48)}を支持するものである。カラマツの各種子産地は互いに孤立しており、規模の小さい集団であると考えられる。このように集団内で交配にあずかる個体数に制限がある集団では、集団内の自由交配に対して機会的な標本抽出の誤差の法則が働いて、淘汰に対する有利・不利性に関わらず、その適応性から見て必ずしも意義のない形質が集団の形成にあずかっている可能性が大きくなると考えられる。すなわち、偶発的な遺伝子浮動 (random genetic drift) がカラマツの遺伝変異の推移に於いて重要な役割をはたしていると考えられる。

7.2.4 試験地間相関

各試験地のヤング係数の種子産地平均値について試験地間の相関を求めたところ、いずれの試験地間にも有意な相関は認められなかったが、ヤング係数を評価基準とした場合、北見枝

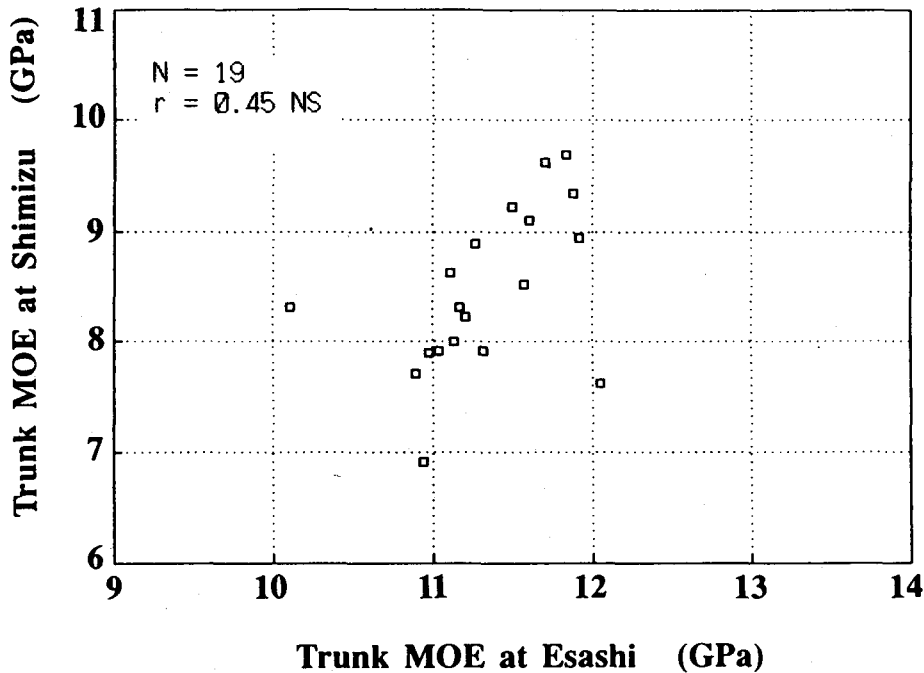


Fig. 7.4 Correlation of MOE between Esashi and Shimizu trial stands.

幸、十勝清水両試験林に共通する優良種子産地と不良種子産地の存在が認められる (Fig. 7.4)。すなわち、樹幹ヤング係数の大きい種子産地としては、富士系吉田三合目、富士系天神峠を、小さい種子産地としては、木曾系御岳、及び木曾系木曾駒ヶ岳を挙げることができる。これらの各2産地の天然分布域はそれぞれ隣接しており、産地×環境の交互作用の影響が小さい種子産地群と考えることができるだろう。したがって、北海道へ造林用の種苗として導入するとするなら上述の富士系2産地が推奨されることになろう。しかしながら、十勝清水試験林におけるこれらの2種子産地と他の種子産地との樹幹ヤング係数の差はわずかであり、さらに、統計的に有意な差が認められなかった北見枝幸試験林での実験結果を考え合わせると、これらの種子産地を造林種苗として導入しても効率的な林木改良につながるとは言い難い。

7.3 要約

本章では、複数のカラマツ産地試験林における諸形質の種子産地間のバラツキ及び樹幹ヤング係数の試験地間における相関を調べた。結果はつぎのように要約できる。

(1) 分散分析の結果、辺縁部の平均年輪幅及び容積密度数、樹心部の平均年輪幅に関して種子産地間に有意差が認められた。しかしながら、胸高直径及び樹心部の容積密度数については有意差は認められなかった。また樹幹ヤング係数に関しては、種子産地間に有意差が認められた試験地は1ヵ所だけで、他の試験林では種子産地間に有意な差は認められなかった。この原

因としては、試験林内の局所的な環境の違いや産地×環境の交互作用の影響が考えられる。

(2) 種子採集地の緯度、経度及び海拔高と種子産地毎の諸形質の間には有意な相関関係が認められなかった。すなわち、明確なトポラインは認められなかった。これらの結果から、偶発的な遺伝子浮動がカラマツの遺伝変異の変化に於いて重要な役割をはたしていることが示唆された。

(3) 樹幹ヤング係数の種子産地平均値について試験地間相関を求めたところ、いずれの試験地間にも有意な相関は認められなかった。しかし、いくつかのヤング係数の大きい種子産地及び小さい種子産地は、北見枝幸、十勝清水両試験林で共通しており、それぞれ、富士系吉田三合目、富士系天神峠、及び木曾系御岳、木曾系木曾駒ヶ岳を挙げることができる。

(4) 3ヶ所の産地試験林の樹幹ヤング係数は最大で約3.4 GPaの差が認められ、生長が最も良好な試験林における樹幹ヤング係数が最も大きい値となった。今回実験を行った試験林の林齢はほぼ同じであることから、この差の主要な原因は植栽環境の違いであると考えられ、土壌、気象因子等の植栽環境の評価が今後の重要な問題であることが示唆された。

第8章 カラマツ精英樹接ぎ木クローンの樹幹ヤング係数

本章では、カラマツ精英樹クローンについて樹幹ヤング係数、容積密度数、胸高直径、年輪幅のクローン内・間のバラツキを調査すると共に、その再現性を検討し、生長・材質共に優良な精英樹クローンの選抜を試みた結果を述べる。

8.1 樹幹ヤング係数のクローン間変異

8.1.1 供試木と実験方法

実験は主に、林木育種センター北海道育種場（北海道江別市）のカラマツ精英樹のクローン集植所で行なった。同集植所に集められている国有林・民有林指定の精英樹331本の接ぎ木クローンの内、75クローンを試験対象とした。同集植所は1クローン1列の列条植栽であり、1984年の間伐を経て、試験時の各クローンの残存本数は4～5本であった。これらのうち曲がり等の欠点の少ないものを各クローン3本ずつ選んで、樹幹ヤング係数と胸高直径を測定したが、クローンによっては樹幹形状の欠点のために2本しか試験できなかったものもあった。また立地による影響を調べる目的で、北海道立林業試験場（北海道美唄市）のクローン集植所においても樹幹ヤング係数および胸高直径の測定を行なった。同集植所は国或いは道指定の精英樹332本の接ぎ木クローンが列条植栽されている。これらのうち、北海道林木育種場の供試ク

Table 8.1 Outlines of sample stands

Locations	Established years	Tested years	Number of tested clones	Number of tested trees
Ebetsu	1962, 1963	1987, 1988, 1989, 1990	75	212
Bibai	1959	1989	25	63

ローンと共通の母樹をもつ 25 クローンを供試クローンとした。両供試林の概要を Table 8.1 に示す。

これらの供試木とは別に林木育種センター北海道育種場のクローン集植所において 1984 年に間伐された材について容積密度数と平均年輪幅を測定した。この間伐は列条植栽されたラメートを 1 本おきに伐った定量的な間伐であり、当該クローンの残存木と表現型における差はないものと考えられる。容積密度数と平均年輪幅は、間伐木の胸高部位から採取した円板について、髓から 5 cm を境界としてその内側の材部と外側の材部に分け、それぞれについて測定した。以下の考察においては、前者を樹心材、後者を辺縁材と呼ぶこととするが、両材部はそれぞれ未成熟材、成熟材にほぼ対応していると考えられる。供試クローンは 75 クローンで、供試木数は各クローン 3 本とした。

8.1.2 諸形質のクローン間変異

胸高直径、樹幹ヤング係数、平均年輪幅および容積密度数の測定結果を Table 8.2 に示す。供試林は列条植栽であり、表現型に対する立地環境の影響がクローン間で異なることが予想されることから、厳密な遺伝率の計算を行なうことはできない。そこで各形質における遺伝因子の寄与率を調べるために分散分析を行ない、クローン内・クローン間の分散比を比較した。結果を Table 8.3 に示す。

Table 8.2 DBH, trunk MOE, ring width and wood density of tested materials from two stands

Sample stand	DBH(cm)		Trunk MOE(GPa)		Average ring width(mm)				Basic Density(kg/cm ³)			
					a)		b)		a)		b)	
	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.
Ebetsu	19.9	2.5	9.24	1.5	5.3	1.0	3.7	0.5	418	33	425	31
Bibai	22.3	2.2	9.65	1.8	—	—	—	—	—	—	—	—

Legend : a) : Values for corewood within 5 cm from the pith.
b) : Values for outerwood 5 cm from the pith.
Each value is calculated from the clonal mean.

Table 8.3 Analyses of variance of observed values among clones

Factors	Degrees of freedom		Variances		Fo
	Among clones	Within clones	Among clones	Within clones	
Trunk MOE	62	126	5.77	0.67	8.56 **
BD a)	40	88	2970.8	1209.2	2.46 *
BD b)	40	88	2743.4	628.2	4.37 **
DBH	62	126	9.96	3.93	2.53 **
ARW a)	40	88	3.21	1.24	2.59 **
ARW b)	40	88	0.64	0.40	1.62 NS

Legend : Fo : Variance ratios. BD : Basic density. ARW : Average ring width.
a) : Values for corewood. b) : Values for outerwood.
* : Significant at 5% level. ** : Significant at 1% level.
NS : Not significant.

辺縁部の平均年輪幅を除く全ての形質について、クローン間に有意差が認められた。分散比の順位は大きい方から、樹幹ヤング係数、辺縁部の容積密度数、樹心部の平均年輪幅、胸高直径の順であり、特に樹幹ヤング係数の分散比は8.56と極めて大きかった。クローン内の樹幹ヤング係数の変動係数の平均値は7.1%で、これは種子産地内の変動係数の平均値が12.2%であるのに比べて小さかった。すなわち、クローンによる集団は種子産地による集団より、バラツキが小さく均質な集団とすることができる。

容積密度数もクローン間の差が大きかった。特に、辺縁部でクローン間の差が大きいのは、辺縁部の平均年輪幅の範囲が比較的狭く、ラメート間で年輪幅の広狭による容積密度数のバラツキが小さいことが一因と考えられる。

樹幹ヤング係数と容積密度数はいずれも、細胞壁厚、仮道管長その他の多くの独立の形質を反映した複合形質と考えることができるが、より複合度が高いと考えられる樹幹ヤング係数の方がクローン間の差が大きいという結果になった。この理由としては両形質の測定部位の範囲の違いを挙げることができるだろう。容積密度数が胸高部位の一つの円板について測定された数値であるのに対して、樹幹ヤング係数は樹幹の地上高70~170 cm区間の平均的な材質を示す数値である。したがって、容積密度数の方が局所的な材質のバラツキや軽度のあて材等の欠点の影響を受けやすくなる結果、誤差分散が大きくなったと考えられる。

平均年輪幅は樹心部については有意差があるが、辺縁部では差が認められなかった。この理由としては、初期生長については遺伝因子の影響が大きいが、その後は隣接木との競争などによる局地的な環境因子の影響が次第に大きくなるものと考えられる。胸高直径に関する分散比は2.53と比較的大きかったが、これは胸高直径が年輪幅の積算値であり、この程度の胸高直径の林木では年輪幅の広い初期生長期の占める割合が大きいためであろう。

これらに関連してクローン毎の樹幹ヤング係数と胸高直径の関係をFig. 8.1に示す。ここでは胸高直径の大きなクローンで樹幹ヤング係数が小さくなる傾向は認められなかった。畠山⁶²⁾はカラマツ精英樹クローンにおいて樹幹の通直性と繊維傾斜度を同時に改良できる可能性を示したが、この結果は材積生長が旺盛でかつ木材強度の優れたクローンが存在していることを示しており興味深い。

8.1.3 試験地間相関

前節で述べたように、胸高直径、樹幹ヤング係数ともにクローン間で高度な有意差が認められ、これらの形質についてそれぞれ順位付けができることがわかった。つぎに異なる試験地での順位関係の再現性の検討を行なう必要がある。そこで、江別市の北海道育種場と美唄市の北海道立林業試験場での測定結果について、クローン平均の試験地間相関を求めた。その結果、胸高直径については相関が全くなかったが、樹幹ヤング係数では1%の有意水準で相関が認められた(Fig. 8.2及びFig. 8.3)。したがって、北海道育種場で得られた樹幹ヤング係数の順位関係は他の地域においても、比較的再現性は高いと考えられる。

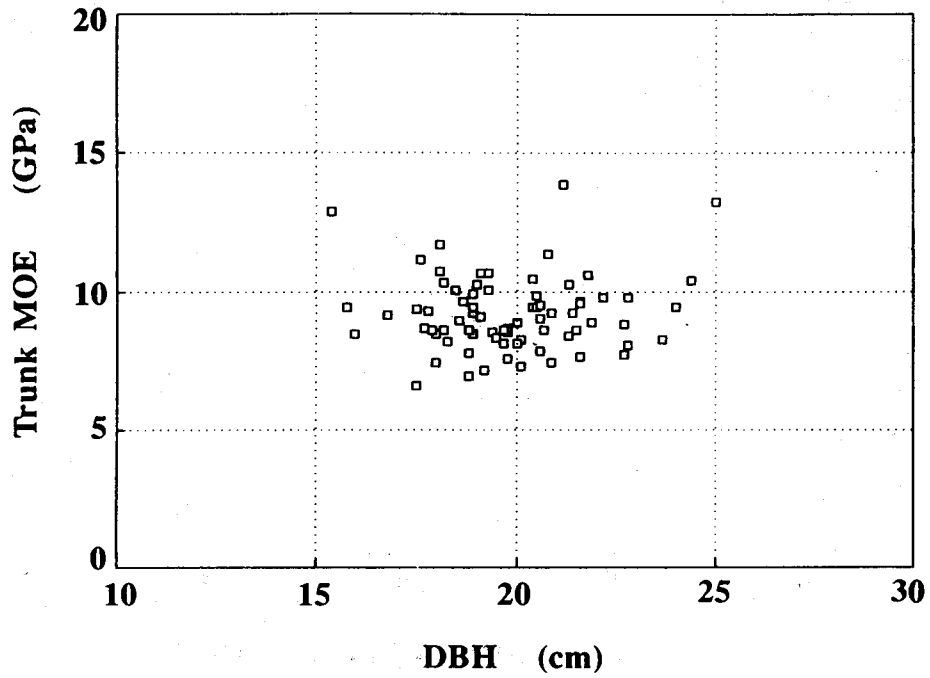


Fig. 8.1 Relationship between DBH and MOE for plus tree clones.

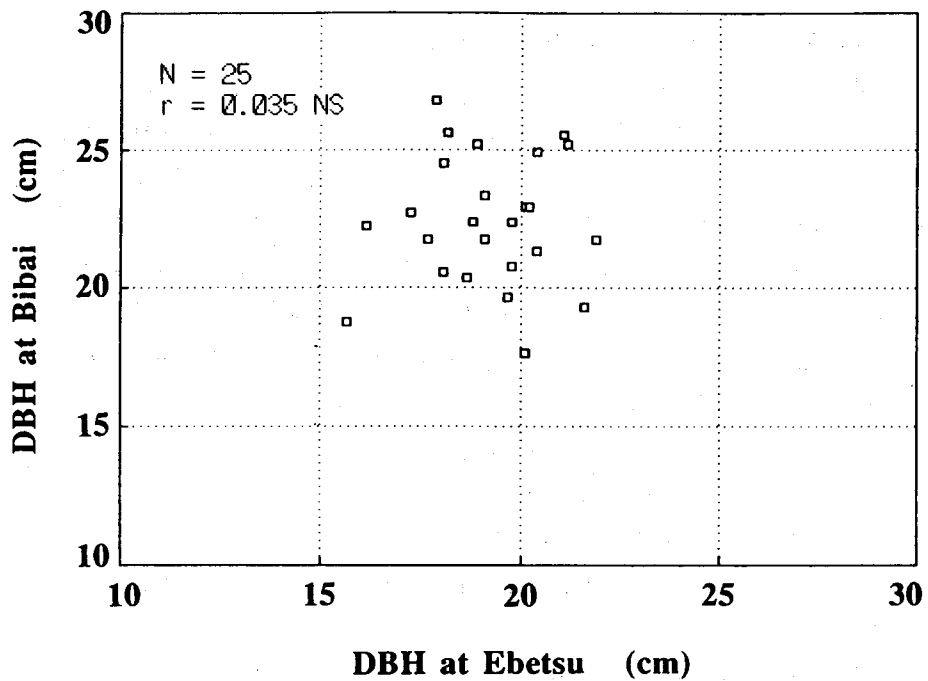


Fig. 8.2 Correlation of DBHs between Ebetsu and Bibai stands.

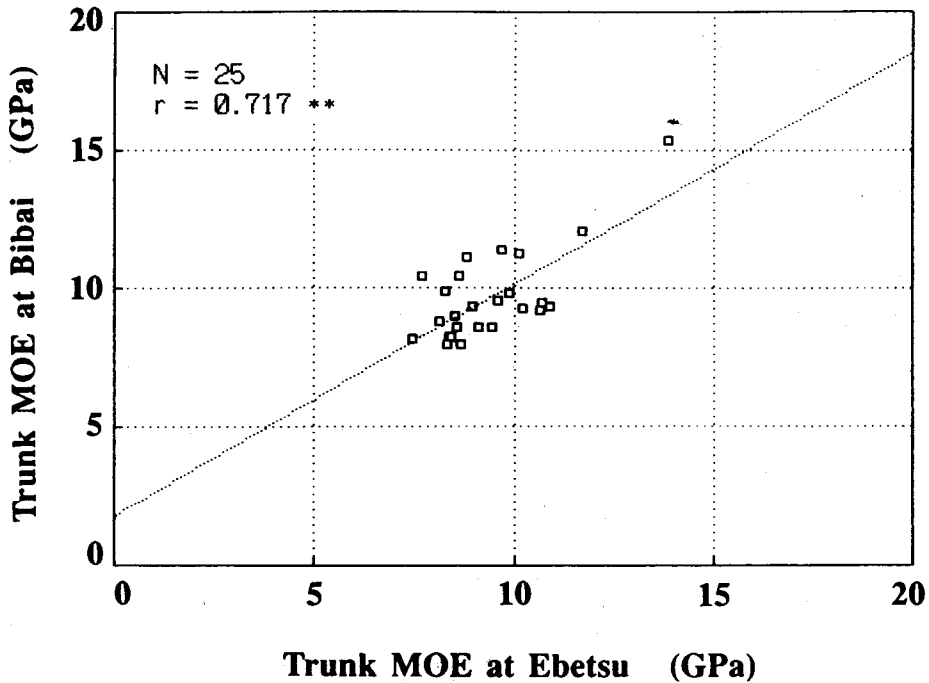


Fig. 8.3 Correlation of trunk MOEs between Ebetsu and Bibai stands.

8.2 実生子供家系における樹幹ヤング係数の再現性

8.2.1 実験方法

実験は王子製紙(株)林木育種研究所(北海道夕張郡栗山町)のカラマツ組合せ能力検定林(1971年春植栽)において行なった。同林は精英樹20本を母樹とした全兄弟家系および自然受粉家系の次代検定林である。試験区は3つのブロックに分れており、それぞれのブロック内のプロットは、苗間・列間ともに2mで2列(一部は1列または4列)に列条植栽されている。ここで、前節の供試精英樹クローンのうち10本を母親とする10家系を供試家系とした。供試家系のうち、5家系は自然受粉家系であるが、残りの5家系は自然受粉家系のほか、5本の精英樹を父親とする全兄弟家系を含んでいる。供試母樹名は以下のとおりである。

母親：空知3，空知9，後志19，網走10，十勝35，

白田3，白田5，白田6，小岩井1，岩泉1

父親：十勝35，後志17，岩泉1，白田6，猪苗代1

現存本数は1986年の間伐(本数率30%の定性間伐)を経て1プロット当たり平均9.7本であった。

測定形質は胸高直径と樹幹ヤング係数とした。胸高直径は全個体のうち道路および開放地に面した林縁の1列と被圧木を除いた724本について、地上高120cm部位の周囲長を測定し

て求めた。樹幹ヤング係数は、これらのうち曲がり等の欠点のないもの 299 本を選んで生立木曲げ試験によって測定した。供試木本数は各プロット当り 5 本を原則としたが残存本数の関係で 4 本以下となったプロットもあった。ブロック別の供試プロット数および供試木本数を Table 8.4 に示す。

8.2.2 結果と考察

胸高直径と樹幹ヤング係数のブロック別の平均値と変動係数を Table 8.5 に示す。両形質とも、ブロック平均値に有意な差は認められなかった。またプロット数や供試木本数がブロックによって異なっているため、以下の分散分析では 3 ブロックのデータを一括して扱うこととする。なお、Table 8.5 において胸高直径の欄の括弧内の数値は樹幹ヤング係数を測定した供試木に関するものである。これらは、全供試木に比べて胸高直径がやや大きく、かつバラツキが小さい。これは供試木の林齢が 18 年と比較的若く、胸高直径の小さな個体は曲がり等の欠点が顕著であり、樹幹ヤング係数の測定木として選ばれなかったためと考えられる。

Table 8.4 Data on plots and trees for sample blocks

Block No.	Plots	Sample trees	
		DBH	Trunk MOE
1	28	287	136
2	21	193	75
3	23	244	88
Total	72	724	299

Table 8.5 Average DBHs and trunk MOEs for sample blocks

Block No.	DBH		Trunk MOE	
	Ave. (cm)	C.V. (%)	Ave. (GPa)	C.V. (%)
1	16.1 (17.0)	14.1 (11.2)	9.14	13.7
2	16.4 (16.6)	14.6 (10.4)	8.88	15.3
3	15.9 (16.4)	15.8 (13.4)	8.76	15.6
Total	16.1 (16.7)	14.8 (11.7)	8.96	14.7

Note : Data in parentheses are of specimens used in the bending test.
Legend : Ave. : Average C.V. : Coefficients of variation.

供試家系のカテゴリーは、共通の母親、父親、片親および両親をもつものの 4 種類である。Table 8.6 および Table 8.7 に、これらの 4 つの家系区分について家系間の差を調べるために分散分析を行なった結果を示す。母親共通家系間の差は、胸高直径、樹幹ヤング係数ともに 5% 水準で有意であったが、分散比はあまり大きくなかった。一方、父親共通家系間の差は胸高直径についてのみ 1% 水準で有意差が認められた。全兄弟家系に関しては、胸高直径、樹幹ヤング係数ともに 1% 水準で有意差が認められた。これに関連して、Table 8.8 に下記の式⁹¹⁾ から算出した特定組合わせ能力 (SCA) を示す。

Table 8.6 Results of analyses of variance for DBH among families

Category	Degrees of freedom		Variances		Fo
	Among clones	Within clones	Among clones	Within clones	
Half-sib ^{a)}	9	714	14.3	5.56	2.56 *
Half-sib ^{b)}	4	424	33.0	5.72	5.76 **
Half-sib ^{c)}	11	1141	19.9	5.64	3.52 **
Full-sib	19	408	20.2	5.24	3.85 **

Legend : Fo : Variance ratios. ^{a)} : Female parent is common.

^{b)} : Male parent is common. ^{c)} : Either parent is common.

* : Significant at 5% level. ** : Significant at 1% level.

Table 8.7 Results of analyses of variance for trunk MOE among families

Category	Degrees of freedom		Variances		Fo
	Among clones	Within clones	Among clones	Within clones	
Half-sib ^{a)}	9	289	3.95	1.67	2.36 *
Half-sib ^{b)}	4	186	4.67	1.67	2.80 NS
Half-sib ^{c)}	11	478	3.79	1.69	2.25 *
Full-sib	19	169	3.85	1.53	2.51 **

Legend : ^{a)}, ^{b)} and ^{c)} : the same as in Table 8.6. NS : Not significant.

* : Significant at 5% level. ** : Significant at 1% level.

Table 8.8 Specific combining abilities of full-sib families

Female parent No.		Male parent No.				
		1	2	3	6	7
1	DBH (cm)		-1.5	-	+0.1	-
	Trunk MOE (GPa)		+0.55	-	+0.21	-
2	DBH (cm)	+0.7		-0.4	-0.5	-
	Trunk MOE (GPa)	-0.43		+0.29	-0.33	-
3	DBH (cm)	-	-2.4		+0.9	+0.9
	Trunk MOE (GPa)	-	+0.15		+0.25	+0.41
4	DBH (cm)	-0.8	-2.0	+0.9	+0.2	+0.5
	Trunk MOE (GPa)	+0.58	-0.48	+0.31	+0.04	+0.82
5	DBH (cm)	+1.9	-0.4	-1.5	+0.5	+0.2
	Trunk MOE (GPa)	-	+0.16	-	-0.25	+0.74

$$SCA = \bar{x}_{sp} - (\bar{x} + GCA_1 + GCA_2) \quad (8.1)$$

ここに、 \bar{x}_{sp} : 当該組合わせの全兄弟家系に関する平均； \bar{x} : 総平均； GCA_1 , GCA_2 : 両親のそれぞれについて求めた一般組合わせ能力（半兄弟家系に関する平均値の総平均からの偏差）。

組合わせ能力とは、交雑されたものが組合わせによって雑種強勢を起こす力を云い、一般組合わせ能力と特定組合わせ能力とがある。一般組合わせ能力とは、ある系統を多数の検定用

系統と交雑して生じた F_1 の雑種強勢の程度を示したもので、特定組合せ能力は、ある特定の系統との間において示される雑種強勢の程度を示すものである。ここでは、供試系統間における優良組合せを明らかにする目的で特定組合せ能力の検定を行なったが、特に能力差の大きい組合せはみられなかった。

家系内の不偏分散の平均値と全供試木を一括して扱った場合の不偏分散の比は、母親および父親共通家系において、両形質ともに1に近く、全兄弟家系ではそれぞれ0.9弱とやや小さくなるが、北海道育種場の結果から算出した母樹クローンの分散の比(胸高直径樹:0.55, 樹幹ヤング係数:0.32)に比べて非常に大きかった。実生の子供家系では遺伝子型が相互に異なることから、遺伝分散がある程度大きくなるのは当然と考えられるが、クローン内のバラツキに比べて家系内のバラツキが大きくなった理由としては、供試林の林齢が18年と若かったことが考えられる。特に、樹幹ヤング係数については、幹の曲がりや傾斜によるあて材や材質の不安定な未成熟材の影響によってバラツキが大きくなったものと考えられる。

8.3 要約

本章では、カラマツ精英樹接ぎ木クローンについて、クローン内・クローン間の材質形質と生長形質のバラツキを検討して、材質・生長両面において優良な精英樹クローンの選抜を試みた。さらに、これらの精英樹の一部を母樹とする実生の次代検定林において、その遺伝性を調査した。結果は以下のように要約できる。

- (1) カラマツ精英樹クローンの材質・生長形質ともにクローン間に有意差が認められた。とくに、樹幹ヤング係数のクローン間の差は大きく、2ヶ所の供試林の試験地間相関も大きかった。
- (2) クローン平均の胸高直径と樹幹ヤング係数の間に相関関係が認められず、両形質ともに優れたクローンが存在することがわかった。この結果は、今後の材質育種の方向性を示すものであり、栄養繁殖法を用いれば、生長が良くかつ機械的性質の優れた個体の生産が可能になると考えられる。
- (3) 実生の次代では、胸高直径、樹幹ヤング係数ともに母親共通家系では5%水準、全兄弟家系では1%水準で有意差が認められたが、家系内のバラツキが母樹クローンのそれより相当大きくなることがわかった。この結果は、母樹クローンがたとえ優良形質を有していたとしても、有性繁殖によって生じた次代では母樹の優良形質を固定しづらいことを示している。
- (4) しかしながら、実生検定林の林齢が比較的若いことがこれらの結果の一因とも考えられることから、今後再試験を行ない樹齢による影響を調べる必要があると考えられる。

第9章 総合考察

本研究では、北海道における主要造林樹種であるカラマツを対象に、種々の発生要因をもつ林木の強度材質の変動を明らかにする目的で、立木の樹幹の曲げ変形から求められるヤング

係数（樹幹ヤング係数）を指標とする林木評価を試みた。実験は北海道内7ヶ所、15林分において行ない、樹幹ヤング係数の測定に供した試験体総数は1359本（立木状態で1215本、丸太状態で144本）である。本章では、一連の実験から得られた知見をもとに、樹幹ヤング係数の材質指標としての妥当性、樹幹ヤング係数の変動特性、林分単位での強度材質検定法、あるいは次期植栽事業に関連したカラマツの材質育種の方向性と林木改良の可能性等に関して総合的な考察を試みた。

本研究で林木評価の指標として用いた樹幹ヤング係数は、再現性が高く、比較的簡便にかつ単木的に林木の強度的材質を評価することができる上、完全に非破壊的に求めることができるという利点をもつ。また、樹幹ヤング係数の測定に要する時間は、供試木1本当り無風時で約5分と比較的短時間であることから、対象林分の全数検定を行なうことも可能となる。従来、林分の評価には標本抽出による調査法が多く用いられてきたが、全数調査による精度の高い情報によって、当該林分のより正確な評価が期待できる。また、樹幹ヤング係数の代りに丸太ヤング係数を用いて胸高直径、年輪幅、晩材率および容積密度数との相互関連を調べた結果、樹幹の曲げ変形から求められるヤング係数は、樹幹の辺縁部の材質を顕著に反映する複合形質であることが確かめられた。したがって、樹幹ヤング係数による林木の評価は、針葉樹造林木の利用上最も有用な材部の強度材質の評価を行なうことに等しいと考えられる。以上のように樹幹ヤング係数によって針葉樹造林木の強度材質を簡便かつ効率的に評価することができる。

樹幹ヤング係数の測定における注意点をまとめると以下のとおりになる。まず測定時期は、第5章で述べた樹幹ヤング係数の年次内変動のパターンから、測定値が安定する9月中旬以降に行なうのが最も効果的であると考えられる。また現状の装置を使用する場合、林木の径級で10~25 cm程度の個体を樹幹ヤング係数の測定対象と考えることができる。10 cm以下の小径木に対しては梃子の長さを調節したり、負荷量を減らすことによって測定可能であるが、木部径の測定誤差効果が大きくなることや、測定区間内の樹幹形状が不整な個体が多いことなど測定値の評価に際して注意が必要である。また、径級が25 cm以上の個体に対する測定では、応力レベルが小さくなるため、モーメント-変位関係の直線性の悪さによる弾性率の評価誤差を生じるおそれがある⁷⁶⁾。これは負荷モーメントを大きくすることで対応することができるが、現状の装置を用いる場合、負荷量を増やす必要があり、これは樹幹の梃子取り付け部への損傷を与える可能性が大きく、梃子の長さを変えるなど装置の改良が必要になる。

樹幹ヤング係数による林木評価の有効な利用法としては、次の2項目を挙げることができる。

- (1) 現存する針葉樹人工造林地に対して林分単位の材質評価を行なう。
- (2) 各種の材質育種事業において強度材質面における成績判定を行なう。

そこで、以下では樹幹ヤング係数の変動特性と関連させながらこの2項目について検討を加えることとする。

第1の項目で挙げた樹幹ヤング係数による針葉樹造林木の林分単位の材質評価は、直接的には当該林分の材質を把握することが目的であるが、同時に将来生産される主伐木の材質に対する予備的な評価の意味ももつ。したがって、林分の評価を行なう場合、当該林分内の材質変動の範囲を明らかにすると共に材質の下限値を明らかにすることが必要となる。

同一林分内の材質のバラツキは、樹幹ヤング係数を指標とした場合、カラマツでは変動係数で約15%程度とみなしてよいと考えられる。比較のために他樹種のバラツキを調べたところ、アカエゾマツでは変動係数で16.4を、トドマツでは変動係数で10.2を得ている。これらに関連して、同一林分内での肥大生長の良否による樹幹ヤング係数の変動を調査したところ、胸高直径と樹幹ヤング係数の関係は樹種によって異なっていた。すなわち、トドマツ、アカエゾマツでは1%水準で負の相関が認められ、肥大生長の良好な個体では樹幹ヤング係数が小さくなる傾向が認められた。したがって、トドマツ、アカエゾマツに対する林分単位の材質評価を行なう場合、供試木の選定に際して胸高直径の範囲をできるだけ広くとる必要がある。一方カラマツでは、樹幹ヤング係数と胸高直径の間に相関は認められず、互いに独立性の高い形質であることがわかった。またカラマツにおける胸高直径に対する樹幹ヤング係数の分布は特異的なものであった。その散布形は台形状であり、林分内で平均的な生長を示している個体群における変動幅をもって林分全体の変動幅とみなすことができる。したがって、カラマツに対して林分単位で材質評価を行なう場合、林分内の平均的な生長を示している個体群の変動を調べることで、林分全体の変動を推定することが可能である。

同一林分内における材質の下限値は、樹幹ヤング係数と胸高直径の関係から推定することができる。すなわち、トドマツ、アカエゾマツでは肥大生長の良好な個体における樹幹ヤング係数を当該林分における下限値とみなすことができる。一方カラマツでは、肥大生長の良否、すなわち胸高直径の大小に関わらず一定の下限値が存在しており、下限値は林分によって異なることがわかった。今回調査した林分を例にとれば、苫小牧では7.0 GPaを、野幌および十勝清水では6.0 GPaを、北見枝幸では9.0 GPaを当該林分の下限値として与えることができる。

林分の材質を評価する際の基準値は木構造計算規準⁹²⁾から求めることができる。すなわち、トドマツ、エゾマツ等の針葉樹IV類に対しては、普通構造材では樹幹ヤング係数で70 tf/cm²、約6.9 GPa、上級構造材では80 tf/cm²、約7.8 GPaが基準値として与えられている。またカラマツは、アカマツ、ベイツガ等と共に針葉樹III類に属しており、普通構造材に対しては80 tf/cm²、約7.8 GPa、上級構造材に対しては90 tf/cm²、約8.8 GPaが与えられている。本来、樹幹ヤング係数は生材丸太のヤング係数を表わすものであり、丸太材のヤング係数は生材から気乾状態まで乾燥するのに伴い約14%程度の増加が見込まれる⁷⁹⁾。したがって、カラマツ等の針葉樹III類およびトドマツ、エゾマツ等の針葉樹IV類に与えられている値から当該林分の樹幹ヤング係数の下限値を逆算すると、針葉樹III類に対しては70 t/cm²、約6.9 GPa以上が、針葉樹IV類に対しては60 t/cm²、約5.9 GPa以上が求められることになる。つまり、樹

齢30年前後の成熟した林分において樹幹ヤング係数の下限値が上記の値以上であれば、その林分は構造材として十分な材質を有する林分と考えることができるだろう。

これらの木構造計算規準から求められる樹種毎の下限値を、本研究で調査した各林分における下限値と比較すると、苫小牧地方のトドマツに関しては肥大生長の良好な個体においても樹幹ヤング係数が7.0 GPaを上回っており、同林分から生産される木材はすべて構造材としての基準強度を有するものと予測される。しかしながら、同じ苫小牧地方のアカエゾマツでは、下限値が6.0 GPaを下回っており、現時点で胸高直径の大きな個体では構造材としての基準強度を満たしていないものが見受けられる。トドマツ、アカエゾマツで、このような基準強度以下の下限値を有する林分に対しては、樹幹ヤング係数と胸高直径の関係を利用して、肥大生長の良好な個体を優先的に間伐することによって林分の下限値を上げるなど主伐木の材質を向上させるような保育管理を行なってゆく必要があると考えられる。

一方カラマツに関しては、今回調査した北海道内7ヶ所のうち野幌、十勝清水地方の林分で基準強度を下回る下限値を有していた。したがって、これらの林分からの間伐材および将来搬出されるであろう主伐材の中には、基準強度に達しないものが多数含まれることが予想され、今後の保育管理を通じて当該林分の材質向上をはかることが必要と考えられる。しかしながら、カラマツの場合、樹幹ヤング係数は胸高直径との相関が認められないことから、トドマツおよびアカエゾマツのように肥大生長の良好な個体を優先的に間伐することによって下限値を上げることは難しい。林分内の全個体に対して樹幹ヤング係数を測定する、いわゆる全数検定を行なうことによって基準値以上の材質を有する個体を識別することは可能であるが、今回実験を行なったような林齢30年以上の林分では、すでに胸高直径が25 cmを超えている個体も多く見受けられることから、現装置を用いた検定は難しい。今後、樹齢と樹幹ヤング係数の関係を明確にすることによって、胸高直径で10 cm程度の比較的若齢期に検定を行なうことができれば、その情報をもとに効率的な育林・保育が可能になるだろう。いずれにしてもカラマツに対しては、今後、間伐法も含めた独自の林業施業体系を確立することが重要な課題と考えられる。

第2の項目で挙げた材質育種事業における強度材質の成績判定の実例として、本研究では、カラマツ精英樹クローン集植所とカラマツ産地試験林において、樹幹ヤング係数による強度材質判定を行なった。

カラマツ精英樹クローンに対する実験では、樹幹ヤング係数においてクローン間に明らかに差異が認められ、異なる試験地間においても樹幹ヤング係数のクローン間の相対関係は良く一致する結果を得た。さらに、クローン平均の胸高直径と樹幹ヤング係数には全く相関関係が認められず、生長、材質両面とも優れたクローンが存在することが明らかとなった。このようなクローンは、それ自身育種カラマツとして有用であるばかりでなく、カラマツF1の母樹としての価値も高いと考えられ、今後のカラマツの材質育種の方針を示すものとして重要な結果を得た。今回実験に供した精英樹は、国有林および道有林指定の精英樹331本のうちの僅か

75本であり、残りの精英樹に対する材質検定の実施は早急な課題であると考えられる。一方、これらの精英樹を母樹とする実生の子供家系に対する実験の結果、樹幹ヤング係数、胸高直径ともに再現性はあまり期待できないことがわかった。この結果は、実生苗を用いた造林では優良形質を次代に伝えることが難しいことを示すものである。

また、カラマツ産地試験林を対象に行なった実験では、種子産地の違いに基づく差異は十勝清水試験林では有意であったが、北見枝幸試験林では不明瞭であった。この原因としては、まず試験林の設定場所が不適切であったことが挙げられる。さらに、各種子産地がそれぞれ産地×環境の交互作用の影響を受けることによってその遺伝的特性の発現に差異を生じていることが推察された。これらに関連して、樹幹ヤング係数を含む諸形質における種子産地間変異には明確なトポラインは認められなかった。また、十勝清水、北見枝幸試験林間における樹幹ヤング係数の産地間相関は統計上有意ではなかったが、樹幹ヤング係数を評価基準とした場合、十勝清水試験林と北見枝幸試験林で共通する優良種子産地と不良種子産地の存在が認められた。すなわち、両試験地で樹幹ヤング係数の大きい種子産地として富士系吉田三合目、富士系天神峠を、小さい種子産地として、木曾系御岳、木曾系木曾駒ヶ岳をそれぞれ挙げることができる。これらの各2種子産地の天然分布域はそれぞれ隣接しており、産地×環境の交互作用の影響が小さい種子産地群と考えることができる。以上の結果を総合すると、種子産地をグループとする選抜では、材質面での向上を促進する可能性はあるものの、その効果は小さく、根本的な林木改良にはつながりにくいと考えられる。

カラマツの場合、挿し木苗の発根性が悪く、事業規模での挿し木増殖の可能性が小さいために、従来の造林には実生苗が用いられてきた。しかしながら、今後木材利用面から強く要求されることは、生産される木材の均質性であり、今回の試験結果から判断すると実生苗による造林ではこの要求に答えることは難しい。したがって、今後のカラマツの林木改良における課題は、早期に栄養繁殖法を確立することであり、その結果、栄養繁殖系を用いて生長が良くかつ力学的性質の優れた個体の生産が可能になると考えられる。また、カラマツの組織培養による増殖も頂芽を用いて研究されており、現段階では発根率が低く実用化されるに至っていないが⁹³⁾、この手法が利用できるようなれば選抜木を直接利用することが可能になり、より効率的な林木改良が期待できることから、今後の発展が期待される分野である。

また、今回実験を行なった3ヶ所のカラマツ産地試験林の平均樹幹ヤング係数は、最大で約3.4 GPaの差が認められ、供試木の平均胸高直径が最も大きい北見枝幸試験林の平均樹幹ヤング係数が最も大きいという結果になった。これらの試験林の林齢や施業履歴にほとんど差がないにも関わらず、このような差異が生じたことは、植栽環境によって生長・材質共に大きく変動することを示すものであろう。今後のカラマツ造林を行なってゆくに際して、栄養繁殖系の母樹として有用な種苗の選定や栄養繁殖法の確立が急がれると共に、土壌および気象因子を数量化することによって植栽環境の評価を行なう方法を確立することが早期に達成すべき重要

な課題であると考ええる。

従来、林木の材質という場合、容積密度数、年輪幅および晩材率といった性質だけが取り上げられていた傾向がある。言うまでもなく、これらの性質は林木の力学的性質の基礎をなすものであるが、木材の強度を推定する指標としては必ずしも十分とは云いがたいように思われる。今後、林業と林産業が緊密な関係を保ちながら、利用目的に応じた材の生産・品質管理を行なってゆくような集約的な育種・育林体系を確立するためには、木材を育成する側と利用する側が木材の弾性係数や強度といった力学的性質に関する共通認識を持つことが必要不可欠であろう。

摘 要

本研究は、北海道における主要造林樹種であるカラマツを対象に、立木の樹幹の曲げ変形から求められるヤング係数（樹幹ヤング係数）を指標とする林木評価を試みたものである。得られた成果は以下のように要約できる。

(1) 丸太ヤング係数を用いて、胸高直径、平均年輪幅、晩材率および容積密度数との相互関係を調べた結果、樹幹の曲げ変形から求められるヤング係数は、試験体の材質、特に樹幹辺縁部の材質を顕著に反映する複合形質であることが明らかになった。したがって、樹幹ヤング係数は非破壊的に針葉樹造林木の強度材質面での評価を行なうにあたり最も効率的な材質指標であると考えられる。

(2) 同一個体の樹幹ヤング係数の年次内変動および経年変動を調査した。その結果、一年次内の樹幹ヤング係数は形成層の活動期間中変動することが確認され、林木の評価を目的とする樹幹ヤング係数の測定は、晩材形成期以降の9月中旬以降に行なうことが効果的であると言える。また、樹幹ヤング係数は樹齢15年前後で急激に増加することが確認された。この変動は始原細胞の成熟に伴う晩材部細胞の強度的性質の変化に対応するものと考えられる。

(3) 樹幹ヤング係数の林地内変動を調査した。その結果、胸高直径と樹幹ヤング係数の関係には樹種特性があることが明らかになった。カラマツでは、胸高直径の大小に関わらず一定の下限値を有しており、林分内で平均的な生長を示している個体群の樹幹ヤング係数の分布範囲が林分全体の樹幹ヤング係数の変動範囲とほぼ一致した。一方、トドマツ、アカエゾマツでは胸高直径と樹幹ヤング係数の間に1%水準で負の相関が認められた。すなわち、肥大生長が良い個体では強度材質が劣る傾向が顕著であった。

(4) カラマツ精英樹クローン75本の樹幹ヤング係数を調べたところ、樹幹ヤング係数のクローン間差は高度に有意であり、試験地間相関も大きかった。また、クローン平均の胸高直径と樹幹ヤング係数の間には相関関係が認められず、両形質ともに優れたクローンが存在することが明らかになった。これらのクローンの存在は、今後のカラマツ材質育種の方向性を示すものとして意義が大きい。

(5) カラマツ産地試験林において種子産地の違いに伴う樹幹ヤング係数の変動を調べた。その結果、各種子産地はそれぞれ産地×環境の交互作用の影響を受けて遺伝的特性の発現に差異を生じていることが推察された。また、十勝清水試験林と北見枝幸試験林で共通する材質優良種子産地と不良種子産地が認められたが、樹幹ヤング係数の両試験地間における相関は統計上認められず、種子産地によるグルーピングでは根本的な林木改良は望めないと考えられた。

(6) 樹幹ヤング係数による林木の評価の有効な利用法は、林分単位の材質評価および各種材質育種事業における強度材質面からの成績判定を行なうことであり、その具体的な方法を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 農林水産省告示第143号(1991): 針葉樹の構造用製材の日本農林規格。
- 2) 北海道林務部(1991): 北海道林業の概況, pp. 35.
- 3) 重松頼生(1970) カラマツの材質試験(II) —容積重と強度の樹幹内分布—, 第19回日本林学会中部支部講演集, 95-96.
- 4) 重松頼生(1974) カラマツの材質試験(XII) —強度的性質の樹幹内変動—, 第23回日本林学会中部支部講演集, 208-213.
- 5) 重松頼生(1972): カラマツの材質試験(V) —未成熟材における回旋木理の現れかた—, 第21回日本林学会中部支部講演集, 56-60.
- 6) 重松頼生(1973): カラマツの材質試験(IX) —容積密度と仮道管長の関係—, 第22回日本林学会中部支部講演集, 21-24.
- 7) 重松頼生(1976): カラマツの材質試験(XVI) —早材および晩材の比重について—, 第25回日本林学会中部支部講演集, 41-47.
- 8) 重松頼生(1980): カラマツの材質試験(XIX) —肥大生長に伴う材質の変動について—, 第28回日本林学会中部支部講演集, 253-258.
- 9) 加納 孟, 中川伸策, 斎藤久夫(1964): カラマツ用材品質について(第1報), 林業試験場報告, 162, 1-44.
- 10) 加納 孟, 中川伸策, 斎藤久夫, 重松頼生(1964): カラマツ用材品質について(第2報), 林業試験場報告, 182, 113-147.
- 11) 宮島 寛(1985): 苫小牧地方演習林産造林木3樹種の基礎材質, 北海道大学農学部演習林研究報告, 42(4), 1089-1116.
- 12) 宮島 寛(1958): 苫小牧演習林産人工植栽ストロブマツ, バンクスマツおよびカラマツの材質試験, 北海道大学農学部演習林研究報告, 19(3), 99-216.
- 13) 宮島 寛, 長谷川賢司(1978): 交雑カラマツ造林木の材質試験, 北海道大学農学部演習林研究報告, 35(1), 139-156.
- 14) 宮島 寛(1979): 有珠山噴火による降灰被害カラマツ造林木の材質試験, 日本木材学会北海道支部講演集, 11号, 35-39.
- 15) 小泉章夫, 上田恒司, 片寄 纈(1987): カラマツ間伐材の力学的性質, 北海道大学農学部演習林研究報告, 44(1), 327-354.
- 16) 小泉章夫, 高田克彦, 上田恒司(1989): 檜山地方演習林の造林木の樹幹ヤング係数, 北海道大学農学部演習林研究報告, 46(2), 441-450.
- 17) 片寄 纈, 織田春紀(1982): カラマツの材質育種事業, 北海道の林木育種, 25(2), 14-21.
- 18) 三上 進(1988): カラマツの材質育種に関する研究—回旋木理の遺伝的改良—, 林木育種場研究報告, 6,

47-152.

- 19) 千葉 茂, 永田義明, 幸田秀穂(1980) : カラマツの振れに関する選抜, 北海道の林木育種, 23(1), 8-12.
- 20) 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, 北海道の林木育種, 23(1), 13-16.
- 21) Langner, W. (1958) : Planung und erste Ergebnisse eines Japanlärchen Provenienzversuches. Cbl. f. d. ges. Forstw., 75(3/5), 168-196.
- 22) Schober, R., et al. (1958) : Ergebnisse von Lärchen-Art- und Provenienzversuchen. Silvae Genetica, 7, 137-154.
- 23) Langner, W.(1961) : An international provenance trial with Larix leptolepis. Proc. 8th Northeastern For. Tree Imp. Conf., 6-8.
- 24) 柳原利夫ほか2名(1961) : カラマツ産地試験の経過について, 長野林友, 9, 5-13.
- 25) 柳沢聡雄(1961) : ニホンカラマツの種子の産地の違いが苗木の生長周期に及ぼす影響, 林業試験場北海道支所年報, 65-70.
- 26) Stairs, G.R. (1965) : Geographic variation in Japanese larch. State Univ. N.Y., Coll. For., Syracuse Univ. Mimeo. 7pp.
- 27) 梅原 博, 飯塚三男, 荒井国幸 (1965) : カラマツ産地試験, 林業試験場木曾分場年報, 3-5.
- 28) Hattermer, H.H. (1968) : Versuche zur geographischen Variation bei der japanischen Lärche 1. Silvae Genetica, 17(5/6), 182-192.
- 29) Hattermer, H.H. : Versuche zur geographischen Variation bei der japanischen Lärche 2. Silvae Genetica, 18(1/2), 1-23(1969).
- 30) 丸岡富次郎 (1969) : カラマツ産地別クローンの生育調査, 北海道林木育種場業務報告(1), 121-127.
- 31) 荒井国幸, 飯塚三男, 原 光好 (1969) : カラマツ産地試験, 第80回日林講, 202-204.
- 32) Schönbach, H., et al. (1966) : Die Jugendwuchsleistung, Dürre und Frostresistenz verschiedener Provenienzen der japanischen Lärche. Silvae Genetica, 15(5/6), 141-147.
- 33) Genys, J.B. (1972) : Diversity in Japanese larch from different provenances studied in Maryland. Proc. 19th Northeastern For. Tree Imp. Conf., 2-11.
- 34) 倉橋昭夫, 佐々木忠兵衛, 高橋康夫, 浜谷稔夫(1972) : カラマツ産地試験林—東京大学北海道演習林における植栽10年後の結果—, 北海道の林木育種, 15(1), 23-27.
- 35) 北海道林木育種協会編 (1972) : 「カラマツ産地試験」の合同発表について, 北海道の林木育種, 15(1), 1-27.
- 36) Farnsworth, D.H., et al. (1972) : Geographic variation in Japanese larch in north central United States plantation. Silvae Genetica, 21(3/4), 139-147.
- 37) 千葉 茂, 永田義明 (1973) : カラマツ産地試験, 北海道の林木育種, 15(1), 17-22.
- 38) 水野仁志(1973) : カラマツ先枯れ病にたいする樹種および産地のちがいによる抵抗性の差異, 北海道の林木育種, 16(1), 35-38.
- 39) 荒井国幸, 兵頭正寛 (1971) : カラマツ産地試験, 林業試験場木曾分場年報, 1-8.
- 40) 三上 進, 長坂壽俊 (1974) : カラマツの繊維傾斜度と種の産地, 日本林学会誌, 56(6), 228-230.
- 41) Chen H. Lee (1976) : Geographic variation of growth and wood properties in Japanese larch in southwestern lower Michigan. Proc. 12th Lake States For. Tree Imp. Conf., 35-46.
- 42) 三上 進 (1972) : カラマツの同位酵素における産地間変異, 第83回日本林学会発表論文集, 195-197.
- 43) 三上 進 (1971) : カラマツの産地特性, 林木の育種, 66, 2-5.
- 44) Toda, R. and Mikami, S. (1976) : The provenance trials of Japanese larch in Japan and the tentative achievement. Silvae Genetica, 25, 209-216.
- 45) Robak, H. (1982) : The provenance experiment 1957 in Larix leptolepis Gord. at Husnes in Sunnhordland. Medd. Nor. Inst. Skogforsk., 36(13), 1-33.
- 46) Park, Y.S. and Fowler, D.P. (1983) : A provenance test of Japanese larch in eastern Canada including

- comparative data on European larch and tamarack. *Silvae Genetica*, 32, 96-101.
- 47) 倉橋昭夫, 佐々木忠兵衛, 小笠原繁男, 浜谷稔夫(1985): カラマツ産地試験 25 年間の結果, 第 96 回日本林学会発表論文集, 289-290.
 - 48) Loo, L., Fowler, D.P. and Schneider, M.H. (1982): Geographic variation in specific gravity among Japanese larch from different provenances. *Wood Fiber*, 14, 281-286.
 - 49) 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(1), 2-6.
 - 50) 松崎智徳, 長坂壽俊, 岸田昭雄, 中村和子(1991): カラマツ産地試験 30 年目の結果, 第 102 回日本林学会発表論文集, 437-438.
 - 51) 倉橋昭夫, 佐々木忠兵衛, 小笠原繁男, 井口和信(1990): カラマツ産地試験 31 年間の結果, 北海道の林木育種, 33(2), 5-9.
 - 52) Schober, R. and Rau, H.M. (1991): Ergebnisse des I. Internationalen Japanlärchen-Provenienzversuches. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, 102.
 - 53) 岸田昭雄 (1978): カラマツ先枯れ病の抵抗性, 北海道の林木育種, 21(1), 14-18.
 - 54) 千葉 茂, 永田義明 (1978): カラマツ先枯れ病抵抗性育種, 北海道の林木育種, 21(1), 19-21.
 - 55) 岸田昭雄, 中村和子 (1985): ニホンカラマツ先枯れ病抵抗性の検定, 北海道の林木育種, 25(1), 15-19.
 - 56) 鯨島惇一郎 (1975): カラマツ落葉病の抵抗性育種, 北海道の林木育種, 18(2), 11-18.
 - 57) 鯨島惇一郎 (1978): カラマツ落葉病の抵抗性, 北海道の林木育種, 21(1), 7-11.
 - 58) 千葉 茂, 永田義明 (1978): カラマツ落葉病の抵抗性, 北海道の林木育種, 21(1), 11-13.
 - 59) 中川伸策 (1980): カラマツの母樹とクローンの繊維傾斜度の関係, *林業試験場研究報告*, 312, 21-43.
 - 60) 片寄 禎, 織田春紀 (1984): カラマツの材質育種事業(II), 北海道の林木育種, 27(1), 7-11.
 - 61) 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, 第 96 回日本林学会発表論文集, 287-288.
 - 62) 畠山末吉 (1982): カラマツ精英樹の材質と材質育種, 北海道の林木育種, 25(2), 1-5.
 - 63) 大島紹郎, 江州克弘, 畠山末吉 (1985): カラマツの樹幹通直性および材質の精英樹クローン間変異, 第 96 回日本林学会発表論文集, 285-286.
 - 64) 野堀嘉裕, 永田義明, 千葉 茂(1988): カラマツ属の育種に関する研究, *日本林学会北海道支部論文集*, 36, 105-107.
 - 65) 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), 第 99 回日本林学会発表論文集, 239-240.
 - 66) 小泉章夫, 高田克彦, 上田恒司, 片寄 禎 (1990): カラマツ精英樹の肥大生長と材質 (第 1 報), *木材学会誌*, 36(2), 98-102.
 - 67) 小泉章夫, 高田克彦, 上田恒司(1990): カラマツ精英樹の肥大生長と材質 (第 2 報), *木材学会誌*, 36(9), 704-708.
 - 68) 片寄 禎, 小泉章夫, 高田克彦(1990): カラマツ類精英樹のクローン特性—樹幹ヤング係数—, 北海道の林木育種, 33(2), 14-16.
 - 69) 沢田 稔 (1979): 木材の力学的材質指標, 第 29 回日本木材学会大会特別講演要旨集, 1-13.
 - 70) 祖父江信夫(1989): 振動現象を利用した実大構造材の弾性率測定—理論と応用—, 平成元年度文部省科学研究費資料, pp 57.
 - 71) Cown, D.J. (1982): Use of the Pilodyn Tester for estimating wood density in standing trees. *FRI Bulletin*, 13, 1-9.
 - 72) 小暮 仁ほか 6 名 (1984): 立木年輪測定用可搬型 X 線 C T の開発, 第 34 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 322.
 - 73) 大熊幹章(1991): 振動による立木材質の測定法の検討と立木材質を基準とする新しい間伐法の開発, 平成 2 年度科学研究費補助金研究成果報告書, p. 80.

- 74) 小泉章夫, 上田恒司 (1986): 立木の曲げ試験による材質評価 (第1報), 木材学会誌, 32(9), 669-676.
- 75) 有馬孝禮ほか4名 (1990): 木材の打撃音分析によるヤング係数と水分変動の評価, 材料, 39(444), 44-50.
- 76) 小泉章夫 (1987): 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究, 北海道大学農学部演習林研究報告, 44(4), 1329-1415.
- 77) 林木育種協会 (1989): 精英樹の材質評価手法に関する調査報告書 (昭和63年度).
- 78) 林木育種協会 (1990): 精英樹の材質評価手法に関する調査報告書 (平成元年度).
- 79) 小泉章夫, 上田恒司 (1987): 丸太材の曲げおよび振り性能, 北海道大学農学部演習林研究報告, 44(1), 355-380.
- 80) 海本 一, 江口 篤 (1989): 打撃音の周波数によるヤング係数の測定, 奈良県林試木材加工資料, 18, 1-7.
- 81) 小玉泰義 (1990): 音速による変断面形状を有する木材のヤング係数推定方法 (第1報) 丸太材への適用法, 木材学会誌, 36(11), 997-1003.
- 82) 久保隆文 (1985): 針葉樹の年輪構造とその形成に関する基礎的研究, 東京農工大学演習林報告, 21, 1-70.
- 83) 小泉章夫, 上田恒司 (1986): 立木曲げ試験による材質評価 (第2報), 木材学会誌, 32(11), 860-867.
- 84) 今川一志 (1985): 樹木の木部形成, 特にその季節的経過に関する研究, 北海道大学農学部演習林研究報告, 42(1), 149-178.
- 85) 今川一志, 石田茂雄 (1970): 樹木の木部形成に関する研究 (I) 北海道大学農学部演習林研究報告, 27(2), 373-394.
- 86) Imagawa, H. and Ishida, S. (1981): Study on the seasonal development of the secondary phloem in *Larix leptolepis*. Res. Bull. Coll. Exp. For. Hokkaido Univ., 38(1), 45-54.
- 87) 鈴木正治 (1968): 針葉樹の弾性および強度的性質と細胞構造の関係について, 林業試験場研究報告, 212, 89-149.
- 88) 太田貞明 (1972): スギ・ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学的特性に関する基礎的研究, 九州大学農学部演習林報告, 45, 1-80.
- 89) 半沢道郎, 沢田 稔 (1969): カラマツ材の性質と利用, pp 207, 北方林業会業書
- 90) 小泉章夫, 上田恒司 (1987): 立木の曲げ試験による材質評価 (第3報), 木材学会誌, 33(6), 450-456.
- 91) Zobel, B., Talbert, J. (1984): Tree Improvement, John Wiley & Sons, pp. 125.
- 92) 日本建築学会 (1988): 木構造計算規準・同解説, 丸善.
- 93) 板鼻直栄 (1988): カラマツの芽培養による増殖の可能性, 日本林学会東北支部会誌, 38, 88-89.
- 94) 高田克彦, 小泉章夫, 上田恒司 (1989): カラマツ精英樹クローンの生長とヤング係数, 北海道大学農学部演習林研究報告, 46(4), 989-1001.
- 95) 高田克彦, 小泉章夫, 上田恒司 (1992): カラマツ産地試験林における樹幹ヤング係数の地理的変異, 木材学会誌, 38(3), 222-227.
- 96) 高田克彦, 小泉章夫, 上田恒司 (1992): カラマツにおける肥大生長と材質の種子産地間差, 木材学会誌, 38(12), 1082-1088.

Summary

The object of this study is to estimate wood quality of forest trees by means of modulus of elasticity of tree-trunk (trunk MOE) for Japanese larch (*Larix leptolepis* Gord. syn. *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) Five experiments included in this paper are briefly stated as follows:

1 Relationships between modulus of elasticity of green log specimen and four wood characteristics (Chapter 4)

In order to examine the basic properties of trunk MOE, the relationships between modulus of elasticity of green log specimen (MOE of green log) and four wood characteristics (Diameter at breast height, Ring width, Basic density and Latewood percentage) were investigated. The MOE

of green log computed from static bending deflections were used in substitution for trunk MOE. The values of the latter three characteristics were determined from both the core wood and the outer wood. The results are summarized as follows.

- (1) The MOE of green log had a good correlations with basic density and latewood percentage. No correlation was found between the MOE of green log and diameter at breast height (Table 4.3).
- (2) The core wood-outer wood correlations for basic density and latewood percentage were statistically significant (Table 4.3).
- (3) These results indicated that the trunk MOE value obtained by tree bending test non-destructively represents an expected value for the mechanical quality of outer wood of the sample trunk.

2 Variation of trunk MOE associated with radial growth (Chapter 5)

In this chapter, the seasonal and year-to-year variations of the trunk MOE were observed to research the trunk size effect associated with radial growth on the trunk MOE. The results are summarized as follows.

- (1) The trunk MOE varied throughout the growth season in a year (Fig. 5.2). The measurement of trunk MOE to estimate wood quality of forest trees should carry out after the middle of September. This is because diameter at breast height and trunk MOE came into stable.
- (2) The trunk MOE increased markedly at an age about 15 years after planting (Fig. 5.3). This variation may be attributed to the change of mechanical property of latewood cells.
- (3) After 30 years from planting, the trunk MOE increased by 2~4 % per year constantly (Fig. 5.4). This increase may be caused by the change of the proportion of mature wood area in cross section of tree trunk.
- (4) The age-age correlations for the trunk MOE for the identical tree were significant (Table 5.2~5.4).

3 Within-site variation of the trunk MOE (Chapter 6)

In order to investigate the within-site variation of the trunk MOE associated with magnitude of diameter at breast height (DBH), the trunk MOE was measured in plantation forests. The tested species were Japanese larch (*Larix leptolepis* Gord.), Saghalin fir (*Abies sachalinensis* Mast.) and Saghalin spruce (*Picea glehnii* Mast.). The results are summarized as follows.

- (1) In Saghalin fir and Saghalin spruce, the DBH-trunk MOE correlation was negative and statistically significant at 1 % level (Fig. 6.1 (B), (C)). On the other hand, there was no correlation between DBH and trunk MOE in Japanese larch (Fig. 6.1 (A)).
- (2) Two features can be found in the scatter diagram of DBH and trunk MOE for Japanese larch (Fig. 6.1 (A)); Firstly there was a certain lower limited value for trunk MOE in a given site regardless of magnitude of DBH. Secondly, we can regard the variation of the trunk MOE measured for trees with moderate growth in a given site as the variation of trunk MOE for the site.

4 Genetic variation of the trunk MOE among provenances (Chapter 7)

The trunk MOEs were investigated in three provenance trial stands in Hokkaido. The object of this chapter was to estimate the variability of wood quality among and within provenances and to determine the correlation between the three trial stands. The results are summarized as follows.

- (1) Statistical differences of trunk MOEs among sample provenances were determined by analyses of variances (Table 7.8). There was a significant difference at 1 % level among provenances only in Shimizu trial stand.

- (2) Although the correlation coefficients between the three trial stands were small, some better or worse provenances in the trunk MOE ranking were common in Esashi and Shimizu trial stands (Fig. 7.4). The provenance \times environment interaction may be weak for these provenances.
- (3) The correlations between the trunk MOE and the geographic patterns such as latitude or elevation of the provenances were not significant. This result supports the fact that random genetic drift plays an important role in the development of genetic variation in Japanese larch.
- (4) The mean trunk MOE for all sources are 8.47 GPa for Shimizu trial stand and 11.32 GPa for Esashi trial stand. This difference must be attributed to the environmental effect because the ages and silvicultural background were almost the same.

5 Genetic variation of the trunk MOE among plus-tree clones (Chapter 8)

Radial growth, wood density and trunk MOE of plus-tree clones were measured, and radial growth and trunk MOE of offspring families of plus-tree clones were investigated. The object of this chapter was to estimate the genetic variability of characteristics related to growth and mechanical properties, and to determine the relationships between these characteristics. The results are summarized as follows.

- (1) Statistical differences of radial growth and mechanical properties, included the trunk MOE among the sample clones were determined by analyses of variances (Table 8.3). The trunk MOEs had considerably smaller variances within clones than among clones, and they had good correlations between two sample stands (Fig. 8.3).
- (2) No correlation was found between diameter at breast height and the trunk MOE of the sample clones (Fig. 8.1). Thus, parent trees having suitable performances both for growth and mechanical properties can be selected for propagation.
- (3) Diameter at breast height and trunk MOE had significant differences among families. The significant levels were 5 % for half-sib families and 1 % for full-sib families (Table 8.6 and 8.7).
- (4) Correlation coefficients for parent-offspring relationships were -0.26 for diameter at breast height and 0.36 for trunk MOE which were not significant at the 5 % level. Narrow-sense heritability for trunk MOEs calculated from parent-offspring regressions was 0.41 .

In this study, the trunk MOE which obtained non-destructively by the tree bending test investigated for 1359 trees, in 15 stands. The results from chapter 4 and 5 very clearly show that we can estimate wood quality of forest trees by means of the trunk MOE efficiently. In chapter 9, based on the results obtained in this study, the concrete assessment of the mechanical quality for the plantation forest was discussed. In addition, the usefulness of this trunk MOE value as quality index was emphasized for the breeding