

高度木材利用に適合する品質管理型木材 生産への林木育種的対応に関する研究

藤澤義武¹⁾

Yoshitake FUJISAWA¹⁾

Forest tree breeding systems for a forestry based on the concept of quality
management considering the production of high level raw materials.

目 次

1 緒論	34
2 スギ材質指標のありかた	36
2. 1 スギ材への木材工業からの要望	36
2. 1. 1 木材工業に適合する材質指標	36
2. 1. 2 利用上スギ材に要求される品質と関係の深い木材性質	37
2. 2 林木育種に連携する材質指標	38
3 研究方法	40
3. 1 供試材料	40
3. 1. 1 バラツキの実態を検討するための一般造林地の材	40
3. 1. 2 家系間のバラツキを検討するために自然受粉家系別に植栽した林 分の材	40
3. 1. 3 狭義の遺伝率を検討するために人工交配家系別に植栽した林分の 材	41
3. 1. 4 施業の効果を検討するために植栽密度別にクローンを植栽した林 分の材	41

1) 林木育種センター育種第2研究室

Forest Tree Breeding Center, the Secund Laboratory, 3809-1 Ishi, Juo, Taga, Ibaraki 319-1301 Japan.

本論文は九州大学博士号請求論文である。

3. 1. 5 環境によるバラツキを検討するために地域別にクローンを植栽した林分の材	42
3. 2 供試材の採取方法	42
3. 3 測定方法	43
3. 3. 1 ヤング率	43
3. 3. 2 容積密度	44
3. 3. 3 生材含水率	44
3. 3. 4 年輪構造	45
3. 4 データ解析法	45
3. 4. 1 欠測値をおぎない、より高い精度で分析するための最小自乗法	45
3. 4. 2 環境と遺伝子型の交互作用を分析するための Eberhart and Russell による方法	45
4 実生造林地における木材性質のバラツキと育種の効果	46
4. 1 結果	46
4. 1. 1 実生林分における木材性質のバラツキ	46
4. 1. 2 実生林分における木材性質の遺伝的母数	47
4. 1. 2. 1 自然受粉家系間のバラツキと遺伝的母数	47
4. 1. 2. 2 人工交配家系間のバラツキと遺伝的母数	49
4. 2 考察	52
4. 2. 1 実生林分における木材性質についての育種効果	52
4. 2. 2 実生林分で可能な木材性質のバラツキの育種による制御と限界	54
4. 3 結論	54
5 クローン林業の選択	55
5. 1 結果	55
5. 1. 1 木材性質のバラツキについてクローンと実生との比較	55
5. 1. 2 クローンの木材性質に関する遺伝的母数	57
5. 2 考察	58
5. 2. 1 クローン林分における木材性質についての育種効果	58
5. 2. 2 クローン林分における木材性質のバラツキの育種による制御	59
5. 3 結論	61
6 クローンに関する育種効果の林業への適用の検討	61
6. 1 結果	62

6. 1. 1 ヤング率と胸高直径のクローン間変異および林分間変異	62
6. 1. 2 ヤング率と胸高直径に関するバラツキの原因別分割	63
6. 1. 3 クローンと林分の交互作用および検定林間の相関関係	64
6. 2 考察	67
6. 2. 1 クローンのヤング率と胸高直径の複数林分を含めた育種効果	67
6. 2. 2 クローンと林分によるヤング率と胸高直径の変動	68
6. 2. 3 クローン林業の「品質管理型木材生産」への適用法の検討	69
6. 3 結論	71
7 クローンによる「品質管理型木材生産」における植栽本数の影響についての 考察	72
7. 1 結果	73
7. 1. 1 植栽本数のちがいによる年輪構造の変化	73
7. 1. 2 植栽密度のちがいとクローンによる年輪構造の変異	74
7. 1. 3 植栽密度のちがいがクローンの遺伝的母数に与える影響	77
7. 2 考察	79
7. 3 結論	81
8 総合考察	81
8. 1 木材性質に関する実生とクローンの育種効果の比較	82
8. 2 木材性質のバラツキの育種による制御	85
8. 3 利用に適した木材生産への育種的研究成果の応用	86
8. 4 育種的研究成果を林業へ応用する試み	87
8. 5 育種的研究成果と施業の関係	88
8. 6 クローン林業と実生林業の相互関係	88
8. 7 クローン林業による「品質管理型木材生産」の展望と留意点	90
摘要	91
謝辞	93
引用文献	93
英文摘要	101

1 緒 論

スギ (*Cryptomeria japonica*, D. Don) はわが国では下北半島から屋久島に至る、広い範囲に天然分布している^(前田:1983)。古来より、寺社境内の御神木、あるいは参道の並木などとしてその荘厳なたたずまいが親しまれてきた。同時に、わが国の重要な造林樹種の一つである。九州では500年以上の昔からさし木造林がおこなわれ、60余種ともいわれる在来品種を創り出した^(宮島:1983)。とくに、先の大戦後の国土復興に資することを目的とした拡大造林によって急激に造林面積をふやした。その結果、1000万haに及ぶ人工造林地のうち、面積で50%、蓄積では60%をスギ林が占める^(及川:1983)。これら戦後造林地が伐期をむかえたことから、スギ材の生産量は増加する傾向にあり、1993年現在で国産用材の49%を占めるに至った^(林野庁:1993)。しかし、わが国の木材の需給事情はスギ材にとってきわめてきびしい。林業の動向に関する年次報告^(林野庁:1996)に示されるように木材の自給率がわずか22%まで低下し(1995年現在)、市場はすでに輸入木材にうばわれつつある^(前田:1993)。このように、スギ材は生産量の増大にみあった需要を木材市場にみいだすことがむずかしくなっているのが実状である。

これほど外国産材が一般化した原因は低価格だけにあるのではない。国内産材に比べて外国産材のほうが、供給量が安定していたことも一因であったことが指摘されている^(梶:1991)。また、外国産材のほうが、製材コストなどの面で需要者ニーズへの対応が良いことも一因にあげられている。わが国の在来軸組工法の部材にあわせた外国産製材によって^(梶:1991)、住宅用材の主流は北米材によって占められるにいたっている^(林野庁:1993)。一方わが国は、生産地から需要地への木材の流れを川上と川下に区分して、川上の林業は川下の林産業の動向を必ずしも意識してこなかった。木材生産力の向上をねらった拡大造林についても、造林に際しての適地適木という基本を度外視した。その結果、除間伐の遅れ、病虫害の多発、不成績造林地跡ほか林地崩壊などをまねき、また外国産材の進出もあって満足な結果を得られているとはいえない。

このように、わが国の林業・林産業をとりまく環境はきびしい。とりわけ利用場面と価格において、ベイツガなどの外国産材との競争に直接さらされるスギの状況はさらにきびしいといえる。

ところで、近年は建築基準法などによる規制が緩和されたこともあって^(林野庁:1993)、新しい木材需要を開拓するために木造橋・体育館などの大型木構造・建築物が増加する傾向にある。こうした建造物では、構造計算が義務づけられているうえに乾燥材の使用に向いている^(神谷文夫:1991, 日本建築学会:1995)。そのため、堤が指摘しているように^(堤:1984, 1986, 1989)、木目や材色の評価に重点をおく従来の「木材商業的材質」概念では対応できなくなる可能性がきわめて高い。このような木材需要の変化に対応して、国産材の利用を拡大していくためには、林業と林産業が同一の価値観で密接に連携し、利用に適した木材の生産をはかる一貫した体系をきずかなければならない。ここでいう「同一の価値観」とは、利用にあたっての性能を客観的に示す品質の表示、すなわち材質指標をさす。また、造林木の素質と密接に連携した林木育種は、将来重要な役割をはたすことが期待される。

本来、木材は樹木の生命活動によって蓄積された最終生産物であり、ひいては木材の諸性質には大きなバラツキが存在する^(加納:1973)。同一の樹種であっても、木材性質には産地、個体などの因子によって大きなバラツキを招くだけではない。「未成熟材」あるいは「樹冠材」などの因子は木材性質の個体内推移に大きく関与しており^(E. A. Anderson: 1951, 深沢: 1957, 太田: 1972)、これらの傾向は針葉樹で顕著である。古くは、その大きなバラツキをもつ木材から、利用

目的に適した個体を選択して利用することが一般的におこなわれてきた。しかし、近年にいたって工業原材料ではこの大きなバラツキが重大な障害となった^(加納:1973)。さらには、人工造林木供給側における産地間の競合は、木材工業側による原木品質の選択的利用を可能にしている。

このような状況において、スギは木材性質のバラツキがとくに大きい樹種であると認識されている^(加納:1960, 1961, 1983)。このことに関連して、品種、クローンなどの間では性質のバラツキが大きく、逆に品種、クローンなどの中では性質のバラツキが小さくなるとされる。このことから、性質のバラツキの原因に遺伝的要因が関与していると考えられている^(宮島:1982, 1983, 矢幡他:1989, 見尾:1985, 藤澤:1992A, 藤澤他:1992B, 1993, 1994, 1995A, 1995B, 1995C)。これらによって、スギのバラツキの実態をとらえるためには、品種の概念を導入することが妥当であるとの考えが強まりつつある^(八幡他:1983, 佐々木他:1983, 見尾他:1985, 藤崎他:1985, 小田他:1988, 1989, 古賀他:1990)。スギの品種を込みにした場合に木材性質や力学的性質は大きなバラツキを示す。そこで、品種ごとのバラツキのパラメータを明らかにし、その実態を把握することによって多様化しつつある木材用途に対応し、また木材品質の管理に活かそうとする考えである^(堤他:1986, 1989, 古賀他:1990)。こうした研究は九州を中心にすすめられてきた。この地方では、さし木による品種が古くから存在した。品種は、成長や樹形をはじめとするかずかずの特徴をもつ。このことを、林業や林産業にたずさわる者に一般的な常識として認識されていたことが、背景にあったことを指摘できる。また、九州地方には、古くはスギ品種、近年ではスギ精英樹による品種別、あるいはクローン別に植栽された試験林分が数多く存在する。このことも、木材性質について遺伝・育種的研究をすすめていくうえで、みのがすことのできない事実である。

一方、ある性質に関する遺伝率が高いのであれば、表現型の変異幅が大きいほど選抜差を大きくとることができるので、育種による改良の効果も大きくなる。この点において、スギの木材性質のバラツキが大きいことが、高い育種効果につながる可能性がある。こうしたことから、育種によるスギの材質改良をねらった材質指標の検討が進められている^(小田他:1982, 矢幡他:1987, 小田他:1982, 1988, 堤他:1989, 古賀他:1990, 林野庁:1992)。その結果、木材性質のクローン、実生家系間の遺伝的母数について、林分単位で、多くの情報が集められつつある。しかし、これらの動きは緒についたばかりである。遺伝的研究成果の具体的な利用を念頭におき、横断的かつ総合的な検討はいまだなされていない。わが国の林木育種事業は採種園から生産した種子で増殖することを中心にしてきている。しかし、この場合の育種効果を示す一般組み合わせ能力について木材性質に関してはいまだ得られていない。また、育種によって得られた改良種苗で実際に造林する場合には、種苗の配布区域を決めるために地域による特性の変化の度合いについて知ることが必要である。しかし、このことについても木材性質に関する検討例は皆無である。

本研究の目的は、国産材の現況を改善するためには林業と林産業の連携が必要であると考え、木材性質に関する育種的情報の蓄積の結果から林業と林産業の連携の中で育種がはたすべき役割について考察することにある。蓄積、生産量、いずれにおいても国産材の代表であるスギを例にとり、木材性質のバラツキに関して、変異幅及び遺伝的母数の推定ほかの育種的な検討をくわえる。とくに、育種的研究の中で、これまで重要視されなかった育種的研究成果の実用化に重点をおき、情報の蓄積をはかる。

本研究の構成は、次に示すとおりである。

まず、2において、研究の対象とする木材性質を摘出するために木材工業がスギ材のあるべき姿として望む事項を整理・検討し、その結果によって木材工業と林業を連携させる観点から研究の進むべき方向を示す。3ではこれをうけて研究をすすめるために必要な材と実験の方法をあげる。4は実生林分について育種的な検討をくわえる。

実生林分は、わが国の林木育種事業の主流であり、九州と関西の一部をのぞいたとくに関東以東の地域のスギ造林の実態でもある。一般林分によって木材性質のバラツキの実態を明らかにするとともに、とくにこれまで情報のなかった一般組み合わせ能力から得た狭義の遺伝率によって木材性質に関する育種効果と育種によるバラツキの制御効果とその限界を検討する。5は九州地方のスギ造林の実態であるさし木林分について育種的検討をくわえ、木材性質に関するクローンの育種効果とバラツキの育種的制御の効果をクローン別に植栽された林分の材によって検討する。ここで得られた結果と実生林分で得られた結果を比較・検討することによって、木材工業と林業の連携に対して実生とクローンのどちらがより効果的であるのかを判断する。6はこれまで検討されることのなかった育種的研究成果の実用化の方法について考察することを目的とする。九州地方を網羅するように設置されたクローン林分の材によって、木材性質の地域による変化を明らかにするとともに、これまでに得られた育種成果の具体的な利用法と効果について検討する。施業もまた、木材性質に影響する重要な要素である。7は植栽密度のちがいによる木材性質の変化を調査し、その結果から、木材性質に関する育種効果と施業との相互関係について検討する。8は本研究で明らかにした事項を総合する。その結果にもとづき、利用に適した木材を林業と林産業が連携して生産する「品質管理型木材生産」において、育種のはたす役割と効果について総合的に考察する。そのなかで、今後の研究の方向についても言及する。

2 スギ材質指標のありかた

2. 1 スギ材への木材工業からの要望

2. 1. 1 木材工業に適合する材質指標

針葉樹の建築用製材の最大の需要者である住宅業界では、木造建築を取り巻く社会・技術環境が、近年、大きく変化している。建築方法が、在来の軸組工法に代表される真壁工法から、桝組壁工法（2×4工法など）に代表される大壁工法に移行しつつある。着工数全体が横ばいもしくは減少傾向にあったにもかかわらず、住宅着工数に占める大壁工法の占有率は1983年から1991年までの9年間で1.5%から3.3%までの2倍に急増した^(林産行政研究会:1993)。これにともなって、木質パネル、集成材、合板などの加工材は建築用材消費量に占める比率が上昇し、構造用材の中でも製材などのいわゆるソリッド材の利用は減少しつつある^(林:1993)。在来軸組工法では、建設労務構造の変化に適合させるために、建設現場で行った従来の部材加工から、工場のプレカット加工に転換がすすんでいる。すなわち、1985年から10年間でプレカット工場数は約3倍に急増した^(神谷:1994)。また、1993年現在、木造住宅は住宅着工数の47%を占める。しかし、大型建築物の多い非居住建築物で、木造の占める割合はわずか7%に過ぎない^(建設省:1993)。大型木質構造物は、建築基準に準拠した強度計算と乾燥材の使用が義務づけられるなど、規制が多かった。しかし、「準耐火建築物」の概念の導入など規制が緩和されつつあることから、近年にいたって、3階建住宅、体育館、橋梁などの建築数が増加している。こうした大型木質構造物は、一戸あたりの木材消費量が例えば「出雲ドーム」で2,300m³と大きくなるため、木材の新しい需要を開拓するうえで重要になりつつある。すなわち、次世代の木材利用では、より工業用原材料としての要求が強まっていくことが予想される。

一方、こうした需要環境の変化にたいして、より合理的な材質の指標がもとめられるのは明白であり、木材に対する従来の認識では、販売的にも技術的にも対応がむずかしくなってきた。したがって、旧来の材色、節、年

輪幅などの目視にもとづく材質指標では、今からの木材利用に対応していくことはむずかしいであろう^(堤他:1986, 1989)。例えば、構造材として年輪幅が広いと強度性能に劣るとする考え方が強かったが、現在ではスギ材にたいしてさえも否定的な実証が得られている^(小田他:1989, 1990)。すなわち、構造材の品質指標には、年輪幅は不適當であるとする考えが主流をしめる^(堤他:1989)。他方、マツ類、カラマツをはじめとする多くの針葉樹材において、材縁に位置しない生き節は強さにそれほど影響しないことが報告されており^(USDA: 1972, 宮島: 1992)、節を構造材としての品質の指標にすることは不適當である。このように、目視のみを基準に木材品質を評価することは不適當であるとする考えが、今では支配的になりつつある。これに代るのは物理定数や力学的係数などを指標にする客観的な品質表示であり^(堤他:1986, 1989, 中井:1986, 神谷:1985, 海老原:1986)これは工業原材料としての品質表示としてもつごうがよい。こうした動きに呼応して、1991年に林野庁が制定したのが新しい「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」(JAS)であり、その中には客観的品質表示を目的とした「機械的等級区分」としてヤング率による品等区分が取り入れられた^(全国木材組合連合会:1994)。これは、木材品質の客観的表示を具体化する重要な動きといえる。

2. 1. 2 利用上スギ材に要求される品質と関係の深い木材性質

スギ材は気乾比重が0.30～0.45で、国内産針葉樹の中では比較的軽くて柔らかい材に属する。したがって、鋸断性は優れているが、早材と晩材の密度差が大きいので、カンナ仕上げでは毛羽立ちや晩材の目離れが生じやすい^(西村:1983A)。早材と晩材の間で密度差が大きいことは、カンナ仕上げ同様に単板切削を難しくしており、ロータリー単板は厚さ3mmを越えると裏割れが生じやすいとされる^(西村:1983B)。また、生材で心材含水率の高い個体が多く、これらは人工乾燥時に材表面と材内部との間の水分傾斜が大きく、そのために割れの原因となる。また、含水率の高い木材は含水率の低い木材にくらべて乾燥させるためにより多くのエネルギーを必要とする。このようなことから、スギ材は人工乾燥が難しい樹種とされている^(久田:1985)。さらに、スギは、木構造計算基準で針葉樹のⅣ類に区分され、構造材としては比較的強度が劣る樹種としてとらえられているものの^(日本建築学会:1995)、逆に破壊強度は高いがヤング率が低く、荷重を受けたときの変形量が大きくて構造材に適さない材のあることが指摘されている^(飯島:1991)。強度的性質が劣るとされる原因には、強さそのものが低い場合に加えて、スギでは力学的性質の個体間のバラツキが大きいことから、不利に取り扱われるという現実がある^(川元:1993)。

このように、スギ材を利用するにあたっての大きな問題点としては、強度が低いあるいはそのバラツキが大きい、荷重を受けたときの変形が大きい、人工乾燥が難しい、表面仕上げが悪い、合板への加工が難しいなどがある。また、今から需要が増すと予測される面材への加工では、より太い材が都合が良いであろう。さらに前項の木材の需要動向に示したように、今後は木材利用一般について工業原材料への適合が要求されるようになっていくであろう。

利用と木材性質の関係について、沢田は材質指標として取り上げる木材性質としては実用上の評価に直接結び付く性質が望ましいとし、高い合理性を持つものとしてヤング率を指標とした評価手法を提唱した^(沢田:1972, 宮島:1985)。また、ヤング率は、製材、LVL、集成材が構造用部材として機能するための品質を、正確に予測するために重要な物理定数である^(小泉:1986A, 1986B, 1988, 林:1989, 1992)。さらに、公共工事における乾燥材使用の義務化、新しい日本農林規格における厳密な乾燥材表示、プレカットの普及などにしたがって針葉樹材も人工乾燥が一般化しており、これとともに乾燥特性が重要視されつつある。スギの多湿心材は、人工乾燥コストに大きく影響することから、スギ材で

は生材の心材含水率が人工乾燥への適性を示す重要な材質指標ととらえられている^(久田:1993)。容積密度は木材の細胞壁実質率やかたさと関係が深だけでなく、圧縮及びせん断強さなどの木材の力学的性質と関係が深く^(藤田:1986, 小川他:1988)、しかも木質収量の指標としても重要な木材性質である^(B.J. Zobel:1992)。また、木質パネル用の原材料としては、加工性や歩どまりを向上させるために原木丸太の横断面積は大きい方が良く、このために肥大成長量も木材の品質を考えるうえで重要な性質である。

このように、スギ材を利用するうえの品質と関連が深いこと、より客観的な品質表示などの条件に基づき木材性質について整理・検討をくわえた結果により、重要な木材性質としてヤング率、容積密度、心材含水率、胸高直径をあげる。

2. 2 林木育種に連携する材質指標

わが国における林木育種事業は1957年の精英樹の選抜に始まり、気象害、病虫害に対する育種事業を進めてきたが、成果を収めつつある^(林木育種協会:1987)。この中で、精英樹の諸特性を評価するために造林した検定林は木材性質の評価に耐えうる樹齢にたっしつあり、今は品質を検討する段階にあるといえる。一方、育種の効果は(1)収量、(2)品質向上、(3)抵抗性の付与による栽培域の拡大、(4)資材・労力の節約による経営改善があり、これらを満たしたうえで、品質向上が育種目標として重要になるとする考えがある^(大庭:1989)。同様に育種目標として第一に成長量と適応性を考え、次の段階で材質の向上を図るとする考えもある^(B. J. Zobel:1961, 1970)。このように、木材品質の向上を目的とした育種は、これまでに得た育種効果にさらに品質の向上に関する育種効果をつけ加える方向に進むべきであろう。したがって、木材性質に関する研究材料として、すでに成長形質などの形質が明らかな精英樹を対象にするべきである。また、木材の利用上の性能・品質を示す材質は林木育種事業におけるこれまでの育種目標であった成長、気象害抵抗性とはコンセプトを異にしており、需要者の要請に強く影響される。よって、林木育種による材質の改良では、まず対象となる樹種の利用形態を十分に把握し、利用と育種は同じ価値観で木材の品質を考えなければならない。そのためには、客観的でより合理的な物理定数や強さなどによる木材性質を材質の指標にすべきである。

一方、木材を利用するうえで必要な性能が育種と結び付くためには、それが育種における一定の基準、すなわち育種効果があるのかを判断しなければならない。育種効果とは、育種的研究成果にもとづいた選抜などの作業によって次世代の種苗の特性が改善される効果であり、該当する性質について遺伝率が高く、しかも選抜母集団に大きな変異幅がなければならない。また、ひるがえって利用面ではこの育種効果が利用するうえで具体的な改良効果に結びつかなければならない。一例として構造用製材としての利用を考え、「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」の「機械的等級分」において、ヤング率を育種によって上昇させた結果によって等級区分が1段階上げることがここでいう具体的な改良効果である。このように、林木の育種における材質の研究とは、利用面に適合する材質指標に関して、育種効果の有無を検討することである。

2. 1において、スギ材利用上の問題に基づいて検討した結果から品質指標となりうる木材性質としてヤング率、容積密度、心材含水率、胸高直径をあげた。本研究では、これらの木材性質を研究の対象とする。

わが国の林木育種事業は精英樹を選抜し、これらによって造成された採種園から生産される種子によって改良をはかる集団選抜方式を中心にすすめている。また、スギは九州など一部の地域をのぞいて一般的に実生苗によ

て造林される。このことから、実生における育種効果を検討する必要を認めた。実生の木材性質に関する遺伝的な研究は、容積密度、旋回木理などについて家系間変異から遺伝率を推定した例があるが^{§(宮島他:1982,1983,三上:1988)}、ヤング率や心材含水率について検討した例はなく、本研究においてはじめて検討される。とくに、採種園方式による改良では家系間変異から推定した遺伝率よりも人工交配家系から推定される一般組み合わせ能力のほうが重要であるとされているにもかかわらず、これまでに報告された例は皆無である。一般組み合わせ能力は採種親が花粉親の特性にかかわらず、すぐれた子孫を残す確率を示すものであるが、これまでは自然受粉家系では花粉親の効果を無視できるとして推定した遺伝率であった。本研究ではこれまでのように自然受粉家系によって家系間のばらつきを検討するとともに人工交配家系から一般組み合わせ能力を計算して狭義の遺伝率を得ることによって、これまでの家系遺伝率を検証するとともに採種園産種子による育種効果を検討する。また、育種によって木材性質のバラツキを制御する効果と限界を検討する。

一方、スギは九州地方を中心とした地域ではさし木で造林するのが一般的である。また、さし木は親の遺伝分散をすべて受け継ぐので実生のように遺伝分散を一般組み合わせ能力と特定組み合わせ能力にわけする必要がなく、高い育種効果が期待できる。バラツキについても単一のクローンで造成された林分はすべておなじ遺伝子型で構成されるため、小さくなることが期待できる。また、クローンの木材性質に関する遺伝的研究成果について、容積密度、繊維長、年輪幅などについて報告した例があるが^{§(小田他:1988,1990,古賀他:1990)}、ヤング率、心材含水率についての検討例はない。したがって、クローンの木材性質について、クローン別に植栽した林分の材から育種効果を検討し、また、クローンによる育種の制御で木材性質のバラツキが一般実生からどれくらい減少するのかを検討する必要を認める。

これまで育種的研究成果は遺伝的母数の推定、育種効果の検討として報告されてきたが、育種的成果を実用に供するための研究例はとくにスギでは成長形質について、わずかな報告例^{§(西村他:1993)}があるだけであって、木材性質に関するものは皆無である。そこで、本研究では育種的成果の実用を前提として、種苗がどの地域において特性を発揮するのかを明らかにするため、九州をほぼ網羅するように配置されたクローン林分に着目した。これらの林分から採取した材によって、木材性質の地域のちがいによる変異と林分間の相関関係について、検討をくわえる。また、育種的研究成果の具体的な応用として、利用に適した木材の生産において重要になる親の特性評価が実際に生産される木材にどの程度反映されているのかを、これまでに得られた遺伝的母数を総合して考察する必要を認める。

一方、林業と林産業が連携していくうえにおいて、施業もまた重要な要素である。施業が木材性質に与える影響について、フランスカイガンショウで灌水や施肥による年輪構造の変化が検討されているが^{§(J. W. P. Nicholls: 1971A, 1971B)}、スギで施業と木材性質について検討した例は、樹幹量のちがいによる年輪構造の変化について報告した例があるだけであり^{§(久保他:1979,1983,久保:1985)}、木材性質に関する育種効果と施業の関係に言及した例は皆無である。そこで、本研究では施業と木材性質に関する育種効果との関係をもっとも基本的な施業因子である植栽本数を例にとって検討する必要を認めた。そこで、植栽密度を3段階にかえてスギクローンを植栽した林分から採取した材によって木材性質に関する育種効果と施業の関係を検討した。

最後に本研究で得た育種的研究成果を総合し、林業と林産業が連携して利用に適した木材を生産するうえで育種はどのような形で関与できるのか、また、そこでどのような効果を発揮できるのかを考察する。

したがって、次章ではここに示した研究目的を達成するうえで必要な供試材と実験方法について言及する必要を認める。

3 研究方法

これまでの章において、橋梁、体育館などの大型木構造の増加など、新しい木材需要に対応するには、「木材商業的材質」指標を早く脱却して、物理的・力学的指標に根ざし、今まで以上に客観的な指標に基づく材質の評価が望ましいことを示した。この観点からスギ材を利用するうえで必要な品質と関係の深い木材性質として、ヤング率、容積密度、心材の生材含水率、胸高直径をあげた。本章ではスギ材の木材性質についての育種効果の評価と育種によるバラツキの制御およびその限界、そしてこれら育種的成果の実際の林業への応用に関する研究のための供試材料と実験方法を示す。

3. 1 供試材料

3. 1. 1 バラツキの実態を検討するための一般造林地の材

本供試材は、木材性質に関するバラツキの実態を検討するために茨城県里美村上田代国有林の実生林分から採取したものであり、これを供試材1とする。採取林分は採種園産の母樹別種子を混合して播種された実生苗で造林されており、成長は周囲の同齢林と同じであった。1989年1月、健全で平均的な成長を示す38個体から供試材を採取した。採取時の林齢は17年生であった。

3. 1. 2 家系間のバラツキを検討するために自然受粉家系別に植栽した林分の材

本供試材は、実生家系間のバラツキや遺伝的母数を検討するために茨城県八郷町梶平国有林に位置する次代検

Table 3-1 Sample number per a family on Kanto 10th test stand established by open-pollinated families.

No.	Family name	Sample number			
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Total
1	Chichibu 4	3	-	5	8
2	Shinshiro 1	3	1	7	11
3	Kuji 20	3	2	6	11
4	Minamishidara 5	2	3	5	10
5	Niiharu 4	2	3	4	9
6	Shioya 3	3	5	7	15
7	Ohtuki 5	2	4	5	11
8	Yaita 5	2	2	6	10
9	Tukiyono 4	1	5	5	11
10	Naka 7	2	3	6	11
11	Nishikawa 11	2	2	4	8
12	Mito 8	-	5	5	10
13	Gunma 3	3	3	4	10
14	Control	5	6	5	16
Total		33	44	74	151

Note : Rep. replication

Table 3-2 Sample number per a family on Kanto 13th test stand established by artificially mating families.

No.	♀	♂	Sample number			
			Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Total
1	Masuyama sugi	Kuma sugi	5	4	4	13
2		Kumotoshi	7	7	3	17
3		Iwao sugi	6	6	-	12
4		Urasebaru sugi	7	7	7	21
5		C-1	8	10	6	24
6	Sanbu sugi	Kumotoshi	7	2	2	11
7		Iwao sugi	-	-	4	4
8		Urasebaru sugi	7	6	4	17
9	Okinoyama sugi	Kumotoshi	5	4	4	13
10		Iwao sugi	6	6	5	17
11		Urasebaru sugi	7	6	2	15
12		C-1	8	7	2	17
13	Yabukuguri	Kuma sugi	5	2	4	11
14		Kumotoshi	8	6	4	18
15		Iwao sugi	2	7	4	13
16		Urasebaru sugi	4	4	-	8
17		C-1	6	2	3	11
Total			98	86	58	242

定林（関東 10 号検定林）から採取したものであり、これを供試材 2 とする。採取林分は、関東林木育種場（現林木育種センター：以下同じ）で母樹別に採種・養苗された精英樹家系にくわえ、笠間営林署産実生苗木を対照として用い、造林したものである。本採取林分の家系は 3 回反復をもった乱塊法にしたがって植栽されており、成長は周囲の同齢林と同じであった。1990 年 1 月、本検定林のプロットごとに平均的な成長を示す健全な 1～7 個体から供試材を採取した。家系ごとの採取本数を Table 3-1 に示す。なお、採取時の林齢は 19 年生であった。

3. 1. 3 狭義の遺伝率を検討するために人工交配家系別に植栽した林分の材

本供試材は、母親と父親が明らかな全兄弟家系間のバラツキと一般組み合わせ能力から計算した狭義の遺伝率を検討するために茨城県里美村上田代国有林に位置する遺伝試験林（関東 13 号検定林）から採取したものであり、これを供試材 3 とする。採取林分は、在来の有名スギ品種を親として関東林木育種場で人工交配した家系の実生苗木にくわえ、大子営林署産実生苗木を対照家系として用い、造林したものである。本採取林分の家系は 3 回反復をもった乱塊法にしたがって植栽されており、成長は周囲の同齢林と同じであった。1989 年 1 月、プロットごとに平均的な成長を示す健全な 2～10 個体から供試材を採取した。交配組み合わせごとの採取本数を Table 3-2 に示す。なお、採取時の林齢は 17 年生であった。

3. 1. 4 施業の効果を検討するために植栽密度別にクローンを植栽した林分の材

本供試材は、施業の効果を検討するために埼玉県にある国立林業試験場（現森林総合研究所）赤沼試験地内の植栽密度試験地から採取したものであり、これを供試材 4 とする。本試験地は単位面積当たりの植栽本数を変えた 3 つのプロットを設定し、それぞれのプロットに Table 3-3 に示す 22 の精英樹クローンを植栽したものである。それぞれのプロット内の植栽間隔は標準植栽区が 1.8m × 1.8m 間隔（3,000 本／ha）、密植区が 1.4m × 1.4m 間隔（5,000 本／ha）、高密植区が 1.0m × 1.0m 間隔（10,000 本／ha）であり、各プロット内はクローンごとに 6 本、計 132 本を行と列番号をランダムに選択して配置し、さらに 3 プロットを 1 組としてこれを 2 回反復している。植栽に当たっては、同一クローンが隣合う、あるいは林縁に配置される個体が特定のクローンに偏ることがないように、プロットごとに慎重に配慮されている。この試験地から、1984 年 1 月に各プロットのクローンごとに平均的な成長を示した健全な 2 個体を選び、供試材を採取した。なお、高密植区（10,000 本／ha）では自然枯

Table 3-3 Names and provenances of test material clones in the spacing test stand, and symbols for complete data set.

No.	Clone names	Provenances	Symbols for complete data set
1	Sakashita 2	Fukushima prefecture	○
2	Kitakata 1	Fukushima prefecture	○
3	Wakamatu 2	Fukushima prefecture	
4	Higashishirakawa 1	Fukushima prefecture	○
5	Minamiaizu 5	Fukushima prefecture	
6	Ishikawasyo 5	Fukushima prefecture	○
7	Seta 3	Gunma prefecture	○
8	Kamituga 1	Tochigi prefecture	○
9	Imaichi 2	Tochigi prefecture	○
10	Niihari 2	Ibaraki prefecture	○
11	Niihari 3	Ibaraki prefecture	○
12	Taga 5	Ibaraki prefecture	
13	Kuji 8	Ibaraki prefecture	○
14	Gohdai 1	Chiba prefecture	○
15	Naka 6	Kanagawa prefecture	○
16	Minaminaka 5	Kanagawa prefecture	○
17	Mugi 8	Gifu prefecture	○
18	Mugi 4	Gifu prefecture	○
19	Nagano 5	Nagano prefecture	
20	Ohtuki 1	Yamanashi prefecture	
21	Oh 6	Shizuoka prefecture	○
22	Oh 4	Shizuoka prefecture	

Legend : ○ : the clone getting data from every experimental plot.

死が多いために、全てのプロットから供試材を採取できたのは16クローンであった(Table 3-3を参照)。したがって、供試材を採取した個体数は16(クローン)×2(本)×3(植栽密度)×2(反復)=192本である。採取時の林齢は12年生であった。

3. 1. 5 環境によるバラツキを検討するために地域別にクローンを植栽した林分の材

本供試材は、環境によるバラツキを検討するために九州の、長崎(雲仙山麓)、玖珠(玖珠山麓)、菊池(阿蘇山麓)、矢部(脊梁山脈)、小林(霧島山麓)、内之浦(大隅半島)に植栽した地域差検定林から採取したものであり、これを供試材5とする。九州の地域差検定林は、Table 3-4に示す12のスギ精英樹クローンのさし木苗を九州内の各地に同じ試験設計にしたがって植栽したものである。それぞれの検定林では、各クローンを5列×10行=50本の方形プロットに割り当て、12のプロットを1ブロックとしてこれを3回反復した乱塊法にしたがって植栽されている。各検定林ともに、プロットごとに平均的な成長を示す健全な3個体を選び、供試材とした。したがって、検定林ごとの供試材の採取本数は、3(本)×12(クローン)×3(反復)=108本である。供試材を採取した検定林はFig. 3-1に示す6箇所であり、それぞれの設定年、採取年、及び採取時の林齢をTable 3-5に示す。

3. 2 供試材の採取方法

木材性質は髄から10数年輪の間は未成熟材と呼ばれ、木材性質が不安定である。未成熟材部での木材性質の変化は極めて大きく、例えばスギの仮道管長では髄で1mm前後だったものが10数年輪の間に伸長を続け、3mm以上に達するのが普通である。このように

Table 3-4 Names and provenances of plus-tree clones planted on the six clonal test stands in Kyushu.

No.	Clone name	Breeding regions	Provenances
1	Yame 12	North Kyushu	Kurogi
2	Fujitu 24	North Kyushu	Shiota
3	Karatu 6	North Kyushu	Kiyuragi
4	Fukuokasyo 2	North Kyushu	Nakagawa
5	Taketa 11	Central Kyushu	Taketa
6	Hita 1	Central Kyushu	Kamitue
7	Hiji 1	Central Kyushu	Yamaga
8	Higashiusuki 5	Central Kyushu	Nangou
9	Kuma 5	South Kyushu	Yamae
10	Aira 4	South Kyushu	Shigehisa
11	Kimotuki 2	South Kyushu	Ooura
12	Miyazakisyo 6	South Kyushu	Tano

Table 3-5 General description of the six clonal test stands in Kyushu.

District forest offices	Regions	Establishment years	Sampling years	Stand ages at sampling	Number of samples
Kikuchi(*)	Kumamoto prefecture	1965	1991	26	108
Kusu	Southern area of Ohita prefecture	1967	1992	25	108
Yabe	Kumamoto prefecture	1967	1992	25	108
Nagasaki	Nagasaki prefecture	1968	1992	24	108
Kobayashi	Miyazaki prefecture	1968	1991	23	108
Uchinoura	of Kagoshima prefecture	1970	1991	21	108

(*): Recently renamed as Kumamoto district forest office.

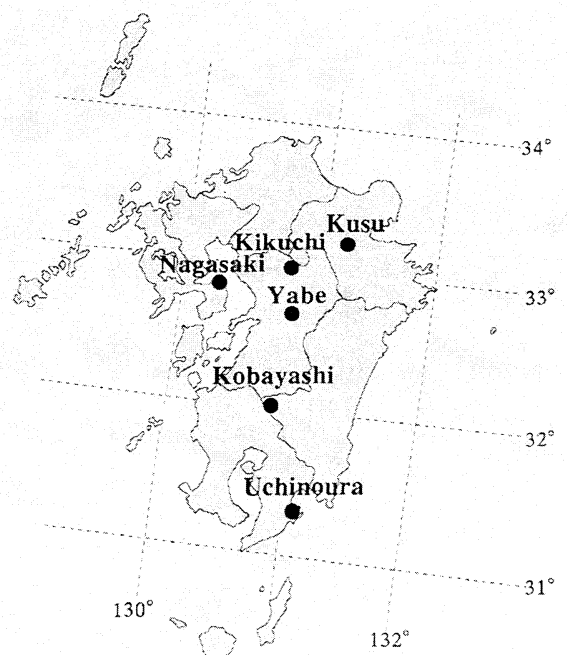


Fig. 3-1 Locations of the six test stands in Kyushu.

大きく変化したのちの外側の木部では仮道管の長さがほぼ一定となり、この現象は仮道管以外の密度、ヤング率など多くの木材性質で観察されている。また、これらの変化は特に針葉樹で顕著である(深沢:1957, 渡辺他:1963, 1964, 太田:1972)。特にスギでは、このような木材性質の樹幹内の大きな変異は、個体間の変異を越えることが知られており(太田:1972, 見尾他:1985, 小田他:1986, 藤澤他:1989A)。試験片をサンプリングするにあたっては、木材性質の個体間の変異をとらえるために十分に配慮しなければならない。こうしたことから、1個体の木材性質を代表させるサンプリング法の検討が重要であると考えられ、B. J. Zobelは胸高直径位置が個体全体のほぼ平均的な性質を示すことを明かにした(B. J. Zobel:1956)。同様に、加納(加納:1954)は胸高部位から枝下高までの部分で、樹心から約10年輪目までの未成熟材部を除いた成熟材部分が供試材に適しているとしている。また、藤澤ら(藤澤他:1989)は

年輪構造の品種間の比較から、試験片の採取高が同じであれば品種の特徴をとらえられることを示した。これら従来の結果を留意して、供試材を樹幹内の適切な高さから採取し、研究に供した。

すなわち、各個体の地上高1m点から上方に1.5m長の丸太を採取し、後述の非破壊(タッピング法)でヤング率を測定した。次にこの丸太の胸高に相当する部分から厚さ10cmの円盤を2枚採取し、それぞれから生材含水率、および容積密度測定と軟エックス線デンストメトリによる年輪構造測定試験片を作製した。これらはFig. 3-2に示したとおりである。

ただし、供試材4は、採取個体の胸高部から軟エックス線デンストメトリ用に厚さ10cmの円盤のみを採取した。

3. 3 測定方法

3. 3. 1 ヤング率

ヤング率は、3. 3に示した1.5m長の生材状態の丸太から、タッピング法(外崎他:1983, 祖父江:1987, 1989, 1990, 1993)を使って非破壊的に測定した。この手法によると、丸太全体の平均値としてのヤング率が得られ、簡便でしかも再現性が高い。本手法で測定したヤング率は、生材状態、乾燥状態ともに柱材のヤング率と相関が高いとされる(田中, 中井:1989, 名波他:1992)。

また供試材の林齢が異なる場合、未成熟材部の影響が懸念されるが、振動リード法(松本:1956, 1958, 1959, 1962)で得た年輪ごとのヤング率から丸太全体のヤング率の径年変化を検討した結果、丸太の年輪数が15年輪を越すと、ほぼ成熟材とみなせる結果が得られている。そこで、

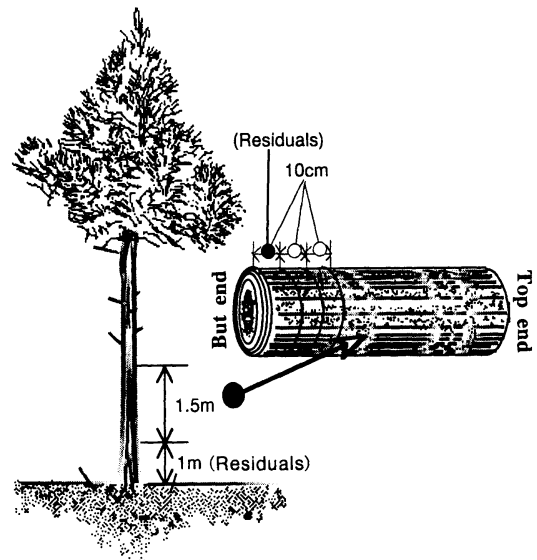


Fig. 3-2 Diagrams of sampling.

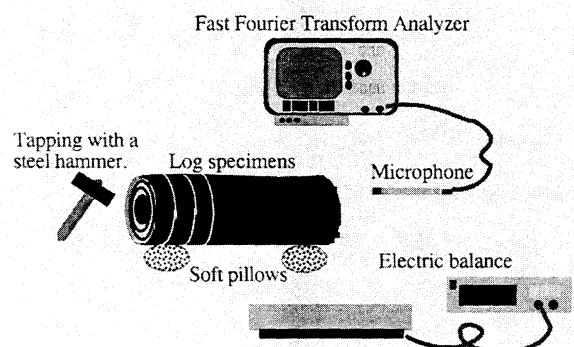


Fig. 3-3 Diagram of a system of the tapping-method system measuring the dynamic moduli of elasticity.

本研究のヤング率測定用の供試材は17年生以上の林分から採取した。

具体的な測定手順を Fig. 3-3 に示す。1.5m 長の生材状態の丸太をウレタンフォーム付きの枕木の上にセットし、一方の端を小型のハンマーで軽くタッピングし、このとき発生する打音を他端からマイクロフォンで採音する。この信号をFFTアナライザ（Fast Fourier Transform analyzer：A&D 社製 AD-3524）へ導入して縦方向の基本振動数（以下基本振動数とする）を得た。同時に丸太の重量、丸太の長さ及び元口、木口径を測定した。これらの測定結果を式3-1に代入することによってヤング率を計算した。

式3-1

$$Ed \text{ (kgf} \times 10^3/\text{cm}^2\text{)} = 4f^2lr/n^2g$$

ここで、Ed；ヤング率，f；基本振動数，l；丸太長，r；比重，n；基本振動数の次数，g；重力加速度である。

3. 3. 2 容積密度

容積密度は、水置換によって体積を測定する常法により測定した。実際の手順はつぎのとおりである。Fig. 3-4 に示すように、胸高部の円盤から髄を含む幅 25mm のストリップを作製し、さらにこのストリップから軸方向の厚さ 20mm、幅 25mm の試験体を作製した。試験体は髄を中心とした2方向に心材、辺材に区分し、それぞれの部分の体積を水置換によって測定したのち、全乾重量を測定した。容積密度は式3-2によって計算した。

式3-2

$$\text{容積密度 (kg/m}^3\text{)} = \text{全乾重量} / \text{体積}$$

供試材4を除き、ここに示した手順で容積密度を測定した。

3. 3. 3 生材含水率

生材含水率は、全乾法の常法にしたがって測定した。実際の手順は次のとおりである。伐倒後、直ちに胸高部から10cm厚の円盤を切り取り、この円盤から Fig. 3-4 に示すように髄を含む幅 25mm のストリップを作製した。ストリップは乾燥を防ぐためにサランラップで密封したのち、-25℃ のフリーザで測定時まで保存した。測定直前に試験体を解凍し、軸方向の厚さ 20mm、幅 25mm の試験体を作製した。試験体は髄を中心とした2方向に心材、白線帯、辺材に区分し、それぞれの生材状態の重量、全乾状態の重量を測定し、式3-3にしたがって生材含水率を算出した。

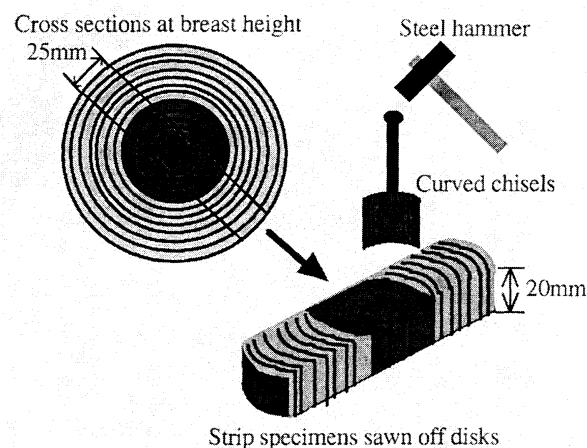


Fig. 3-4 Diagram for the procedure to make specimens for determining the wood density and the moisture content of green wood.

式 3-3

$$MC (\%) = ((W_g - W_0) / W_0) \times 100$$

ここで、MC；生材含水率， W_g ；生材状態の重量， W_0 ；全乾状態の重量である。

3. 3. 4 年輪構造

年輪構造は、軟エックス線・デンストメトリの常法^(H. Poldge et al.:1972, 1978, R. M. Echols:1973, 太田:1978, 林他:1984)にしたがって測定した。胸高部から採取した円盤を気乾近くまで乾燥させたのち、幅 25mm で軸方向の厚み 5mm の髄を含む試験体を作製した。作製した試験体は 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室内で恒量に達するまで調湿したうえで、同室内に設置された軟エックス線撮影装置で透過像を撮影した。撮影条件は軟エックス線照射距離 2.5m、全波整流 17kV、13mA、4 分 40 秒であり、使用したフィルムはコダック XO-MAT-XL、フィルムの現像条件は 20℃、5 分間である。撮影済みフィルムの濃度は JOICE LOEBLE type IIIcs マイクロデンストメータを用いて測定し、条件はスリット幅 50 μ 、スリット高さ 100 μ 、サンプリング間隔 17 μ である。本手法によって、年輪幅 (RW)、年輪ごとの平均密度 (RD)、早材幅 (EW)、晩材幅 (LW)、早材密度 (ED)、晩材密度 (LD) をはじめとする年輪構造を示す指標値が同時に得られる。

3. 4 データ解析法

3. 4. 1 欠測値をおぎない、より高い精度で分析するための最小自乗法

林木は生育期間が長いために、試験地のプロットごとの個体数が枯死によって不ぞろいになるいわゆる「アンバランスデータ」とよばれる状態になり、当初の試験設計が崩れてしまうことがある。特に供試材 2 や供試材 3 では、着花性や結実率の家系間の差によって、家系ごとの植栽本数は試験地の設定時点で既に不ぞろいであった。このような場合、試験地全体の欠測数が 2 本程度までならば簡単な方法で欠測値を補完できるが^(Snedegar, Cochran:1967)、欠測値の数が 2 本をこえるような場合に対応できるのは最小自乗法だけである。データの欠測を最小自乗法で補完して解析した場合、プロットごとのサンプル数が極端に偏っていない限り、サンプル数が完全なデータの解析結果と一致する。ただし、欠測数が極端に多いプロットは平均値や分散が過大に評価されるなどの特質を示すために注意深く分析しなければならない^(栗延他:1981)。とくに、現在ではパーソナルコンピュータで動作する効率的な最小自乗法^(Henderson C. R.:1953)の解析プログラムが開発されている^(栗延:1987, 1991)。

本研究では、欠測値を補完してより完全に近い解析結果を得るため、分散分析、交配家系の分析を含め、最小自乗法に基づいた「アンバランスデータ」でも解析できる栗延の方法によった^(栗延:1987, 1991A)。実際の計算には DEC Micro VAX II 及びパーソナルコンピュータ (NEC PC9801) で動作する BASIC 言語によってコーディングされた解析プログラムを用いた。

3. 4. 2 環境と遺伝子型の交互作用を分析するための Eberhart and Russell による方法

環境と遺伝子型の交互作用は、広い地域での性能の再現性に影響が大きい。九州全域を含む供試材 5 は、クローンと林分の交互作用を Eberhart and Russell の方法^(Eberhart et al.:1966, E. K. Morgenstern et al.:1969, J. B. ST. Clair et al.:1986)にしたがって解析した。本手法は特定の形質について、環境指数に対する遺伝子型ごとの回帰を比較するものであり、環境指数には

形質の環境ごとの全平均値，本研究の場合では林分ごとの測定値の全平均値を用いる。解析の結果，回帰係数が大きい遺伝子型は環境要求性が高く，回帰係数の小さい遺伝子型は環境要求性が低いことを示す。また，本手法は交互作用の状態を遺伝子型ごとの回帰直線で視覚的に判断できる。すなわち，交互作用が存在しないのであれば，回帰直線は平行であり，回帰直線が交差するかあるいは広がる場合にはその程度から交互作用の大きさを視覚的に評価できる。

4 実生造林地における木材性質のバラツキと育種の効果

わが国の林木育種事業は集団選抜方式を重要視しており，精英樹で造成した採種園から生産される種子によって形質を平均的に向上させることをねらっている。採種園では母樹別を区分せずに採種して造林に供するため，実生林分では一つの林分に母樹の異なった多くの家系が混じり合って存在する状態にある。また，スギは九州の全域と関西の一部をのぞき，特に関東・東北地方では実生苗による造林が一般的であり，実生の育種効果はこれらの地域におけるスギ造林の実態に即したものとといえる。

これまでの章で，研究目的を達成するために必要な供試材料と実験方法とを示した。本章では，スギ材の品質と関係が深いとされる木材性質をとりあげ，林業の実態を占める一般の実生林分と育種を目的として実生家系別に造林された試験林分の木材性質を調査する。その結果によって，木材性質についてのバラツキの実態を明らかにし，実生の木材性質に関する育種効果を明らかにするとともに，育種によるバラツキの制御およびその限界について検討する。

4. 1 結果

4. 1. 1 実生林分における木材性質のバラツキ

供試材1（一般生実生林分）の実験結果を Table4-1 に示した。バラツキの程度を示す変動係数は心材含水率が最も大きく42%であり，これに続いて胸高直径が19%，ヤング率が13%であった。逆に変動係数が最も小さいのは容積密度であり，心材容積密度，辺材容積密度ともに11%であった。

一方，Table4-1 は心材含水率の変動係数の大きさを示すものであり，その変異幅は53%から206%までの範囲にあった。このことは心材含水率が最も高い個体では飽水状態に近いことを意味する。このように，最も林分内のバラツキが大きいのは心材含水率であり，逆に最も小さいのは容積密度であった。また，胸高直径とヤング率は心材含水率のバラツキと容積密度のバラツキの中間の大きさを示した。

Table 4-1 Variations in wood properties in 17-year-old seedling stand.

	WOS	WOH	MCH	Ed	DBH
Unit	kg/m ³	kg/m ³	%	tf/cm ²	cm
Minimum values	256	281	53	41	9
Maximum values	422	466	206	72	20
Range	166	184	153	31	11
Mean values	302	345	92	54	13
Standard deviations	33	38	38	7	3
Coefficient variances (%)	11	11	42	13	19

Legend : WOS: Wood density of sapwood, WOH: Wood density of heartwood,
MCH: Moisture content of heartwood,
Ed: Dynamic modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height.

4. 1. 2 実生林分における木材性質の遺伝的母数

4. 1. 2. 1 自然受粉家系間のバラツキと遺伝的母数

供試材 2 (自然受粉家系)の実験結果を Table4-2 に示す。Table4-2 には家系別平均値に加え、家系別平均値間の標準偏差、家系別平均値間の変動係数、全個体の標準偏差、全個体の変動係数を併示した。

Table4-2 から供試材 2 で家系間の変動係数が最も大きいのは、供試材 1 (一般生実生林分) における変動係数の比較と同様に心材含水率の 17% であり、家系別平均値は、月夜野 4 の 73% から新城 1 の 128% までの範囲で変異した。逆に家系間の変動係数が最も小さかったのは容積密度であり、心材容積密度、辺材容積密度ともに 4% であった。家系別平均値は心材容積密度が新城 1 の 354kg/m³ から久慈 20 の 423kg/m³ までの範囲で変異し、辺材容積密度が中 7 の 292kg/m³ から久慈 20 の 336kg/m³ までの範囲で変異した。ヤング率の家系間変動係数は 9%、胸高直径の家系間変動係数は 7% であった。また、ヤング率の家系別平均値は群馬 3 の 41kgf×10³/cm² から矢板 5 の 57kgf×10³/cm² までの範囲で変異し、胸高直径の家系別平均値は水戸 8 の 13cm から中 7 の 16cm までの範囲で変異した。

一方、全個体間の変動係数が最も大きかったのは心材含水率が示した 34% であり、逆に最も小さかったのは心材容積密度と辺材容積密度の 12% と 13% であった。ヤング率と胸高直径の変動係数はそれぞれ 23%、22% であり、心材含水率と容積密度の変動係数値の中間の値を示した。

このように、供試材 2 (自然受粉家系) について、性質ごとの変動係数は家系間、全個体、いずれにおいても心材含水率で最も大きく、逆に容積密度で最も小さくなり、胸高直径とヤング率は心材含水率と容積密度の中間の値を示す結果を得た。また、どの性質においても家系間の変動係数は全個体の変動係数の 1/2 以下であった。

供試材 1 (一般生実生林分) と供試材 2 (自然受粉家系) の木材性質ごとの変動係数の比較結果についてとりまとめると、①性質ごとの全個体間の変動係数の大きさは供試材 1 と供試材 2 とはおなじ傾向であること、②供試材 2 の全個体間の変動係数は心材含水率が最も大きく、胸高直径、ヤング率、容積密度の順であり、これは供試材 1 の変動係数、供試材 2 の家系間変動係数とおなじ傾向であること、③供試材 2 の全個体間の変動係数は家系間の変動係数の 2 ～ 3 倍であることが明らかになった。

家系間のバラツキがどの程度に遺伝によって支配されているのかについて、家系遺伝率から検討した。家系遺伝率を得るために分散分析をおこない、その結果を Table4-3 に示す。Table4-3 には性質ごとの平均平方、期待成

Table 4-2 Family mean values, standard deviations and coefficient variance among family mean values, standard deviations, and coefficient variances among all individuals in 19-year-old open-pollinated families.

No. Family names	WOS	WOH	MCH	Ed	DBH
(unit)	kg/m ³	kg/m ³	%	tf/cm ²	cm
1 Chichibu 4	319	386	118	48	14
2 Shinshiro 1	309	354	128	43	15
3 Kuji 20	336	423	113	50	14
4 Minamishidara 5	307	387	86	47	15
5 Niihari 4	331	393	118	50	14
6 Shioya 3	329	399	117	56	14
7 Ohtuki 5	329	397	96	55	13
8 Yaita 5	333	383	106	57	13
9 Tukiyono 4	307	362	73	51	13
10 Naka 7	292	361	126	45	16
11 Nishikawa 11	305	385	75	46	14
12 Mito 8	317	397	80	49	13
13 Gunma 3	322	384	118	41	13
14 Control	318	380	99	51	14
Total mean values	318	385	104	49	14
Standard deviations among family mean values	12	17	18	5	1
Coefficient variations among family mean values	4	4	17	9	7
Standard deviations among all individuals	42	45	36	11	3
Coefficient variations among all individuals	13	12	35	24	23

Legend: WOS: Wood density of sapwood, WOH: Wood density of heartwood, MCH: Moisture content of heartwood, Ed: Dynamic modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height.

Table 4-3 Analysis of variance of wood properties for 19-year-old open-pollinated families.

Sources of variances		df	WOS	WOH	MCH	ED	DBH
MS	Replications	2	34463.5	27515.0	822.5	367.1	340.0
	Families	13	1731.8	3564.9	3522.8	251.4	9.3
	Interaction between rep. and fam.	24	1248.8	1558.8	1685.3	141.9	8.8
	error	110	1394.2	1489.0	959.7	115.0	3.9
FV	Replications		24.7 *	18.5 ns	0.9 ns	3.2 ns	88.3 *
	Families		1.2 ns	2.4 *	3.7 **	2.2 ns	1.0 ns
	Interaction between rep. and fam.		0.9 ns	1.0 ns	1.8 *	1.2 ns	2.3 **
EVC	Families		49.0	187.7	156.1	9.7	0.0
	Interaction between rep. and fam.		0.0	20.4	212.2	7.9	1.5
	error		1394.2	1489.0	959.7	115.0	3.9
Family heritabilities(%)			13.6	44.2	47.0	29.3	0.0

Legend : MS: Mean squares, FV: F values, EVC: Expectations of variance components, df : degree of freedom,

WOS: Wood density of sapwood, WOH: Wood density of heartwood,

MCH: Moisture content of heartwood,

Ed: Dynamic modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height,

n.s.: Non significant, *: Significant at 5% level, **: Significant at 1% level.

Note : This analysis was calculated according to the least square method.

Few clones lacked samples on one replication.

Therefore, the degree of freedom (df) for the interaction between replications and families was not equal to the product of df for replications and df for families.

分にしたがって算出した変動因別分散成分と式 4-1 に基づいて算出した家系遺伝率を併示した。

式 4-1

$$h^2 = 4\sigma_f / (\sigma_e + \sigma_{ef} + \sigma_f)$$

ここで, h^2 : 家系遺伝率, σ_f : 家系による分散, σ_e : 環境による分散, σ_{ef} : 家系と環境との交互作用による分散である。

分散分析をおこなった結果から, 胸高直径には反復間に 5% 水準, 家系と反復との交互作用に 1% 水準の有意差が認められたが, 家系間には有意差が認められなかった。しかし, 心材の容積密度, 心材含水率にはそれぞれ 5%, 1% 水準で家系間に有意差が認められ, ヤング率には 10% 水準の低い水準ではあるものの家系間差が認められた。また, 心材含水率は家系と反復の交互作用が 5% 水準で有意であったが, 心材容積密度, 辺材容積密度, ヤング率では家系と反復の交互作用は有意ではなかった。胸高直径で反復間に有意差が認められたことによって, 反復ごとの環境にちがいがあったものと考えられる。胸高直径と心材含水率で認められた家系と反復の間の交互作用には環境の差が影響したと考えられ, 逆に交互作用の認められなかった心材容積密度, 辺材容積密度, ヤ

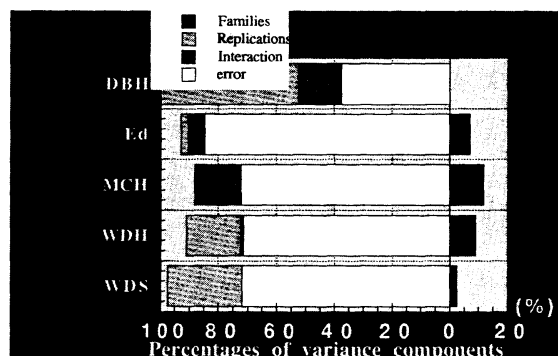


Fig. 4-1 Variance components for wood properties on a nineteen-year-old seedling test stand established with artificially mated families.

Legend : WOS : Wood density of sapwood, WOH : Wood density of heartwood, MCH : Moisture content of heartwood, Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height.

ング率では、こうした環境のちがいによる影響が小さいといえよう。

性質ごとの家系遺伝率は胸高直径が0、心材容積密度が0.44、辺材容積密度が0.14、心材含水率が0.47、ヤング率が0.29であり、胸高直径よりも容積密度、心材含水率、ヤング率が高い。胸高直径は肥大成長を示す指標でもあり、容積密度、心材含水率、ヤング率の変異が肥大成長にくらべてより強く遺伝的に支配されていることが家系遺伝率からわかった。

とりあげた木材性質に関する家系内のバラツキを明らかにするため、変動因別分散成分を計算し、その結果をFig. 4-1に示す。ここで、家系間の分散を正の値、反復間、交互作用および誤差分散を負の値とした。どの木材性質においても、分散の80%以上は誤差と交互作用の分散で占められることがわかり、家系間のバラツキにくらべて家系内のバラツキの方が大きい結果を得た。

4. 1. 2. 2 人工交配家系間のバラツキと遺伝的母数

供試材3（人工交配家系）の交配組み合わせをTable4-4へ示す。3、4ですでにのべたように、供試材3は交配組み合わせの一部が欠測している。このように欠測値があるデータを解析する場合、完全な交配組み合わせになる部分だけを取り出して解析し、他の不備なデータは捨てられるのが普通である。このとき、捨てられた部分の交配、育苗、測定などに要した膨大な労力を無駄にするだけではなく、関与する交配親の数が少なくなってしまうので遺伝的母数の推定精度が低下する。そこで本研究では、得られた交配組み合わせを有効に使って高い精度で遺伝的母数を推定するため、最小自乗法に基づいた解析プログラム DIALSSM^(栗延:1992)によって解析した。これにより、Table4-4に示した交配組み合わせから、雌親と花粉親がそれぞれ9品種のあいだで交配した片面ダイアレル交配として、すなわち、Table4-4において○と×で示したすべての組み合わせについて子供が得られているものとして、一般組み合わせ能力と特定組み合わせ能力を高い精度で推定できる。

解析は以下にのべる2段階で行った。第一段階では、Table4-4に示した17の交配組み合わせについて全兄弟家系として通常の分散分析を行い、家系間に有意差が認められるのかどうかを検討し、家系間に有意差を認めた。そこで、第二段階としてDIALSSMを用いて一般及び特定組み合わせ能力を検定した。

Table4-5に人工交配家系ごとの平均値、家系ごとの平均値間の標準偏差と変動係数、全個体間の標準偏差と変動係数を示す。なお、家系別平均値は最小自乗法によって計算した。

性質ごとの全個体の変動係数には供試材1（一般実生林分）、供試材2（自然受粉家系）とおなじ傾向が認められた。すなわち、変動係数が最も大きいのは心材含水率の示した33%であり、逆に変動係数が最も小さいのは、心材容積密度と辺材容積密度の11%と10%であった。ヤング率、胸高直径の変動係数はそれぞれ18%、22%で心材含水率と容積密度の変動係数のほぼ中間の値を示した。一方、家系別平均値間の変動係数は心材容積密度、辺材容積密度の変動係数が最も小さく、ともに5%であった。この結果は、供試材2（自然受粉家

Table 4-4 Mating parents for 17-year-old artificially mated families.

♀	♂	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Masuyama sugi		×	×	×	×	○	○	○	○	○
2 Sanbu sugi			×	×	×	×	○	○	○	×
3 Okinoyama sugi				×	×	×	○	○	○	○
4 Yabukuguri					×	○	○	○	○	○
5 Kuma sugi						×	×	×	×	×
6 Kumotoshi							×	×	×	×
7 Iwao sugi								×	×	×
8 Urasebaru sugi									×	×
9 C-1										×

Legend: ○: Complete data, ×: Lack of data

系)と同じ傾向であった。ただし、供試材 3 (人工交配家系)と供試材 2 が異なる点は、供試材 3 で心材含水率の変動係数、ヤング率の変動係数がともに13%、胸高直径の変動係数が14パーセントであり、これらの性質の間では、家系別平均値間の変動係数にほとんど差が認められなかったことである。このように、心材含水率の家系間の変動係数は供試材 2 (自然受粉家系)の心材含水率の変動係数よりも低かったが、ヤング率と胸高直径の家系間の変動係数は高かった。しかし、いずれの場合においても、供試材 2 と同じく家系別平均値間の変動係数は全個体間の変動係数の 1/2 以下の大きさであり、供試材 3 (人工交配家系)においても、やはり家系間の変動係数にくらべると家系内の変動係数の方が大きいことがわかった。

家系別平均値については次に示した変異が認められた。心材容積密度、辺材容積密度、心材含水率、ヤング率、胸高直径に関する変異幅は以下のとおりである。心材容積密度はサンプスギ×クモトオシの317kg

/m³からサンプスギ×イワオスギ376kg/m³までの範囲で変異した。辺材容積密度はマヤマスギ×イワオスギの284kg/m³からサンプスギ×イワオスギの358kg/m³までの範囲で変異した。心材含水率はサンプスギ×クモトオシの82%からヤブクグリ×C-1の133%までの範囲で変異した。ヤング率はサンプスギ×クモトオシの34kgf×10³/cm²からオキノヤマスギ×イワオスギとヤブクグリ×ウラセバルスギの57kgf×10³/cm²までの範囲で変異した。胸高直径はサンプスギ×イワオスギの8cmからマヤマスギ×クモトオシの15cmまでの範囲で変異した。供試材 3 (人工交配家系の材)における家系別平均値の変異幅は、いずれの木材性質についても供試材 2 (自然受粉家系)の家系別平均値の変異幅とくらべて若干大きい傾向にあるが、両者の家系別平均値に明らかながいは認められなかった。

特定組み合わせ能力に関する解析の第1段階として、交配家系間の有意差を検討するためにおこなった分散分析の結果を Table 4-6 へ示す。胸高直径は家系間に10%水準の低い有意差が認められ、家系と反復間の交互作用については5%水準の有意差が認められ、反復間の有意差は認められず、肥大成長に影響するほどの反復間の環境差はなかったことがわかった。心材容積密度、辺材容積密度、ヤング率ともに家系間に有意差が認められ、特

Table 4-5 Family mean values, standard deviations, and coefficient variances among family mean values, standard deviations and coefficient variances among all individuals for 17-year-old artificially mated families.

No.	♀	♂	WOS kg/m ³	WOH kg/m ³	MCH %	Ed tf/cm ²	DBH cm
1	Masuyama sugi	Kuma sugi	304	334	92	47	14
2		Kumotoshi	300	322	110	55	15
3		Iwao sugi	284	318	112	56	14
4		Urasebaru sugi	295	333	121	52	14
5		C-1	304	333	127	56	14
6	Sanbu sugi	Kumotoshi	315	317	82	46	12
7		Iwao sugi	358	376	86	34	8
8		Urasebaru sugi	324	358	121	55	11
9	Okinoyama sugi	Kumotoshi	314	337	115	50	13
10		Iwao sugi	302	324	92	50	12
11		Urasebaru sugi	297	323	116	57	13
12		C-1	297	327	125	55	14
13	Yabukuguri	Kuma sugi	296	333	115	41	13
14		Kumotoshi	315	327	116	53	13
15		Iwao sugi	319	327	112	43	12
16		Urasebaru sugi	327	351	123	57	10
17		C-1	316	350	133	48	12
Total mean values			310	335	112	50	13
Standard deviations among family mean values			17	16	15	6	2
Coefficient variations among family mean values			5	5	13	13	14
Standard deviations among all individuals			34	32	36	9	3
Coefficient variations among all individuals			11	10	33	18	22

Legend : WOS: Wood density of sapwood, WOH: Wood density of heartwood, MCH: Moisture content of heartwood, Ed: Dynamic modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height.

にヤング率の家系間のF値は4.7で0.1%水準の高い有意差が認められた。しかし、心材含水率には有意差が認められなかった。また、胸高直径以外の性質には家系と反復の間の交互作用及び反復間に有意差は認められなかった。

このように、供試材3（人工交配家系の材）について、胸高直径、心材容積密度、辺材容積密度、ヤング率に有意差が認められたので、組み合わせ能力について分析を行った。

狭義の遺伝率を求めるためにDIALSSMによって一般及び特定の組み合わせ能力に関する分散分析を行い、その結果をTable4-7へ示す。この表には一般組み合わせ能力（GCA）、特定組み合わせ能力（SCA）の平均平方、F値及び期待成分と式4-2で計算した狭義の遺伝率を併示した。

式4-2

$$h^2 = 4\sigma_a / (\sigma_a + \sigma_d + \sigma_{ef} + \sigma_e)$$

ここで、 h^2 ：狭義の遺伝率、 σ_a ：相加的遺伝分散、 σ_d ：非相加的遺伝分散、 σ_e ：環境による分散、 σ_{ef} ：家系と環境との交互作用による分散である。

組み合わせ能力についての分散分析と家系間の分散分析の結果を比較すると、家系間の分散分析結果とは対照

Table 4-6 Conventional analysis of variances of wood properties on 19-year-old artificially mated families.

	Sources of variances	df	WOS	WOH	MCH	ED	DBH
MS	Replications	2	3001.0	280.0	2499.4	434.3	9.9
	Families	16	2292.3	2078.1	2291.2	336.1	26.1
	Interaction between rep. and fam.	28	965.3	927.6	1778.0	106.3	11.4
	error	183	914.8	910.6	1131.7	71.7	5.6
FV	Replications		3.3 ns	0.3 ns	2.2 ns	6.1 ns	1.8 ns
	Families		2.5 *	2.3 *	2.0 ns	4.7 ***	2.3 ns
	Interaction between rep. and fam.		1.1 ns	1.0 ns	1.6 ns	1.5 ns	2.0 *
EVC	Families		99.1	86.1	34.2	16.4	1.1
	Interaction		10.7	3.6	137.4	7.3	1.2
	error		914.8	910.6	1131.7	72.0	5.6

Legend: MS: Mean squares, FV: F values, EVC: Expectations of variance components, df: degree of freedom, WOS: Wood density of sapwood, WOH: Wood density of heartwood, MCH: Moisture content of heartwood, Ed: Dynamic modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height, n.s.: Non significant, *: Significant at 5% level, **: Significant at 1% level.

Table 4-7 Analysis of variance according to the half diallel on 19-year-old artificially mated families.

	Sources of variances	df	WOS	WOH	MCH	Ed	DBH
MS	G.C.A.	8	2744.8	2146.0	3520.9	419.8	43.4
	S.C.A.	8	1841.5	2011.0	1061.5	252.5	8.9
	fam.	28	964.7	927.4	1778.0	106.3	11.4
	error	183	914.8	910.6	1131.7	71.7	5.6
FV	G.C.A.		1.5 ns	1.1 ns	3.3 ns	1.7 ns	4.9 *
	S.C.A.		1.9 ns	2.2 ns	0.6 ns	2.4 ns	0.8 ns
	fam.		1.1 ns	1.0 ns	1.6 ns	1.5 ns	2.0 *
ECV	G.C.A.		19.0	0.7	57.7	3.5	0.8
	S.C.A.		68.9	85.0	0.0	11.6	0.0
	fam.		10.2	3.4	132.4	7.1	1.2
	error		914.8	910.6	1131.7	71.7	5.6
Narrow sense heritability (%)			7.4	0.3	16.7	14.4	38.2

Legend: MS: Mean squares, FV: F values, EVC: Expectations of variance components, df: degree of freedom, WOS: Wood density of sapwood, WOH: Wood density of heartwood, MCH: Moisture content of heartwood, Ed: Dynamic modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height, GCA: General combining ability, SCA: Specific combining ability, n.s.: Non-significant, *: Significant at 5% level, **: Significant at 1% level.

的に組み合わせ能力についての分散分析結果では、胸高直径についての狭義の遺伝率が最も高いことを示す結果となった。組み合わせ能力の分析において、胸高直径だけに5%水準で一般組み合わせ能力に有意差が認められ、心材含水率に10%水準の低い有意性が認められたが、それ以外の性質には一般組み合わせ能力に有意差は認められなかった。そのため、狭義の遺伝率は胸高直径が0.38であったのに対し、心材含水率が0.17、ヤング率が0.14と低く、辺材容積密度と心材容積密度では狭義の遺伝率はほとんど認められなかった。

Table4-6とTable4-7のちがいを理解するために一般組み合わせ能力と特定組み合わせ能力の分散寄与率を

Fig. 4-2に示す。この図で一般組み合わせ能力と特定組み合わせ能力の寄与率の合計は家系間の分散の寄与率と一致する。したがって、ヤング率、辺材容積密度についての家系間の分散寄与率は、胸高直径についての家系間の分散寄与率とおなじ大きさかそれを上回るものであることがわかる。しかし、ヤング率、辺材容積密度では家系間分散に占める特定組み合わせ能力の比率が高いために、Table4-7に示した一般組み合わせ能力だけから計算される狭義の遺伝率は低くなったと考えられる。

また、Fig. 4-2に示した一般組み合わせ能力と特定組み合わせ能力の寄与率の合計を差し引いた残りが誤差と交互作用分散であって、その値は80%を越える。このように、供試材2（自然受粉家系）同様に家系間の分散にくらべて家系内の分散が大きい結果が得られた。

4. 2 考察

4. 2. 1 実生林分における木材性質についての育種効果

供試材2（自然受粉家系）から推定した家系遺伝率は、胸高直径では0であったが、辺材容積密度が0.14、心材容積密度が0.44、ヤング率が0.29、心材含水率が0.47であった。胸高直径の家系遺伝率が0であったのはTable4-3の分散分析結果に示されるように、家系と反復間の交互作用が大きいことから家系間分散が認められなかったためであり、このことには反復間の有意差によって示される反復ごとの環境の差が影響していたことによると考えられる。このような林分においても、心材容積密度、ヤング率、心材含水率には比較的高い家系遺伝率が認められた。したがって、ヤング率、容積密度、心材含水率は胸高直径にくらべて遺伝による影響が強く、環境のちがいによる影響は小さいといえよう。アカマツの容積密度について胸高直径にくらべて環境による影響が小さく、狭義の遺伝率が高かったとしているが（三上他1989）、本研究によって重要な木材性質であるにもかかわらず育種的検討がなされることのなかった心材含水率やヤング率についても容積密度と同様かそれ以上に家系遺伝率が高いことが明らかになった。

一般的に採種園産の種子によって苗木を増殖する場合の育種効果は、花粉親にかかわらず特定の採種親から優秀な子供が得られる確率を示す一般組み合わせ能力から計算した狭義の遺伝率によってのみ示すことができると

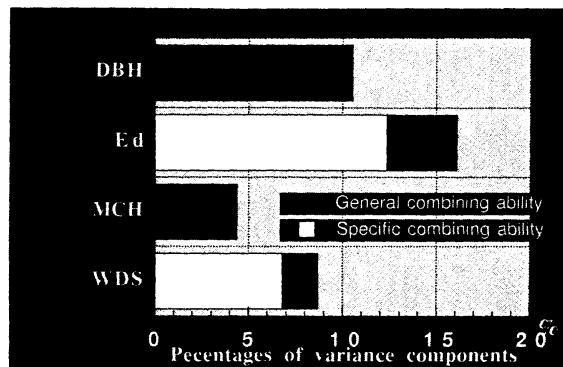


Fig. 4-2 Ratios of specific and general combining abilities to total variance of wood properties.

Legend : WOS : Wood density of sapwood, WOH : Wood density of heartwood, MCH : Moisture content of heartwood, Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height.

される。しかし、木材性質に関する狭義の遺伝率について、これまでは花粉親の効果が無視できるとして自然受粉家系から推定した遺伝率を報告した例があるだけで、人工交配家系の測定結果にもとづいて一般組み合わせ能力と特定組み合わせ能力を推定し、一般組み合わせ能力から計算した狭義の遺伝率を検討した例は皆無であった。そこで、本研究では狭義の遺伝率を計算するために設定された供試材3（人工交配家系）から一般組み合わせ能力を計算し、その結果に基づき自然受粉家系に関して従来得られた結果および供試材2（自然受粉家系）で得られた結果から推定した遺伝率を検討した。その結果、一般組み合わせ能力による狭義の遺伝率は、自然受粉家系の遺伝率と異なって胸高直径に関して高い狭義の遺伝率が認められた。すなわち、狭義の遺伝率はヤング率が0.14、心材含水率が0.17、辺材容積密度と心材含水率がほぼ0といずれも値が低かったが、胸高直径の狭義の遺伝率は0.38と他の性質より高い結果が得られた。これはヤング率、心・辺材容積密度は家系間の分散寄与率が高いものの、特定組み合わせ能力が大きいために狭義の遺伝率が小さく推定されたことによる。この結果は自然受粉家系から推定した家系遺伝率はヤング率の方が高く、胸高直径の方が低い結果と矛盾するように見えるが、次のように考えることができる。スギは半径10数mの範囲の花粉によって受粉する場合が60%以上を占めるとされ^(菊池・古越:1976)、このことは自然受粉家系であっても実際には花粉親の数が周囲の数個体に限定されていることを意味する。採種親ごとの花粉親の効果に差があるとすると、その差は家系内の誤差ではなく、家系間の差を大きくする方向に働く。これらによって、特定組み合わせ能力が大きいのであれば花粉親の効果が無視できる場合にくらべて採種親の効果が見かけ以上に大きくなり、家系間差が大きく評価される。この場合、一般組み合わせ能力が低くても狭義の遺伝率は高く評価されることになり、特定組み合わせ能力が高いとするヤング率、容積密度のほうが胸高直径よりも自然受粉家系から推定した家系遺伝率が高く評価される可能性がある。栗延は複数検定林に植栽されたスギ自然受粉家系の木材性質の調査結果について、家系と林分間の交互作用が高いことを報告しており、その原因として、①家系と環境の交互作用、②特定組み合わせ能力が高く採種園ごとの花粉親の違いが強く影響したことを推測している^(栗延:1991B, 林野庁:1992)。これについても本研究で得られたようにヤング率、容積密度は特定組み合わせ能力が高いと考えることによって説明できる。また、これらの結果によって、単一林分に植栽された自然受粉家系だけからヤング率や容積密度に関する狭義の遺伝率を推定する場合には過大評価する危険性があることがわかった。一方、ラジアータパインの人工交配家系による解析例では、年輪ごとの容積密度に高い一般組み合わせ能力が認められている^(Nicholls J. W.:1980)。これは髓から3、4年輪における研究例なので本研究結果とは同一に扱うことはできないが、容積密度に関して特定組み合わせ能力が高いのはスギの特徴であることも考えられる。

このように容積密度、ヤング率、心材含水率は胸高直径にくらべて家系遺伝率が高く、しかもヤング率、心材含水率では家系間の変異幅も胸高直径より大きく、より大きな育種効果を期待できる。しかし、ヤング率、容積密度では特定組み合わせ能力が高いと考えられるので、本研究において得られた高い育種効果を確実にするためには、優れた子供を作る親の間で人工交配する、あるいは優れた子供を作る親だけで構成されているバイクロール採種園（2クロール採種園）などを考慮しなければならない。また、容積密度の遺伝率は高いが、変異幅が小さいために遺伝獲得量が小さくなり、育種効果はそれほど高くないと予想された。スギ材の有効利用をはかるためにはパルプ原料としての利用についても留意する必要がある。この点において、木材の実質を示す指標である容積密度は成長量に関する改良と組み合わせることで、木材実質量の増大への効果が期待できるで

あろう。

4. 2. 2 実生林分で可能な木材性質のバラツキの育種による制御と限界

九州地方および関西地方の一部をのぞき、特に関東以東ではスギは実生で造林するのが一般的であり、実生を材料とした検討はこれらの林業の実態に即したものであるとも言える。本研究における検討結果として、実生の木材性質に関してはこれまでの成長量に関する育種効果よりも高い育種効果が得られる可能性があることがわかった。そこで、育種学的検討からすぐれた性質をもつことが期待できる家系を選び、それら家系別に造林することによってこれまで実生林分で示された木材性質のバラツキがどれほど減少するのかを検討した。供試材1（一般実生林分）における木材性質の変異は、家系を区分しない通常の実生林分における木材性質のバラツキを代表していると考えられ、これは市場に流通する木材の性質のバラツキの実体を示すともいえる。供試材2（自然受粉家系）、供試材3（人工交配家系）は複数の自然受粉家系、人工交配家系で構成されており、供試材1（一般実生林分）で示した木材性質のバラツキの実態に対し、家系区分することによる木材性質のバラツキの変化を評価できる。

自然受粉家系、交配家系によって構成された供試材2（自然受粉家系）、供試材3（人工交配家系）ともに、家系を込みにした林分単位の変動係数は、供試材1（一般実生林分）から求めた変動係数と一致する。このことによって、実生家系を込みにした林分単位の木材性質のバラツキは一般の実生林分における木材性質のバラツキを示し、家系を区分することによるバラツキの変化は家系別に造林した場合の林分内の木材性質のバラツキを示すものと考えることができる。そこで、自然受粉家系、人工交配家系それぞれにおける分散分析表からそれぞれの期待成分の寄与率を計算し、家系間の分散寄与率だけを性質別にとりだし、Fig. 4-3 にまとめた。家系別に造林した場合には家系間の分散を考慮する必要がないので、家系別に造林することによってバラツキが減少すると期待できるのは家系間の分散であるともいえる。最も大きい家系間分散の値を示したヤング率においても17%であり、残りの誤差と交互作用の分散は83%と大きい値をとる。

したがって、実生では家系別に造林したとしても、家系の区別を考慮しない現状の実生林分に比べて、バラツキを小さくすることは期待できないことがわかった。

4. 3 結論

本章における供試材1（一般実生林分）、供試材2（自然受粉家系）、供試材3（人工交配家系）によって木材性質のバラツキと遺伝的母数について考察することにより、次のことがわかった。

- (1) 実生では集団選抜によって特にヤング率、心材含水率では成長量と同等かそれ以上の改良効果が得られるが、その改良効果は利用面で要求される範囲を下回るものである。

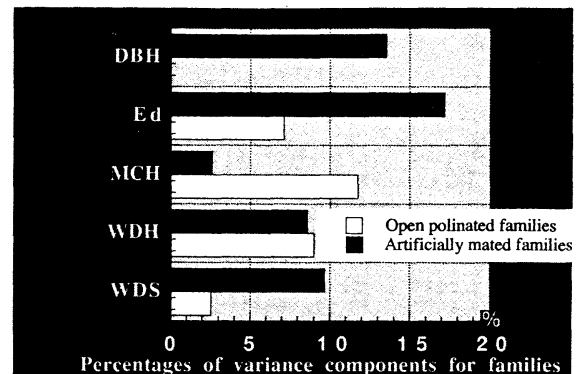


Fig. 4-3 Comparison of percentages of variance components for families among wood properties.

Legend : WOS : Wood density of sapwood, WOH : Wood density of heartwood, MCH : Moisture content of heartwood, Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height.

(2) 実生のヤング率と容積密度は、家系間の変異は大きいと特定組み合わせ能力が大きいために育種効果を確実に得るためにはバイクロナル採種園(2クロン採種園)や人工交配など、特別の配慮が必要になる。

(3) 実生家系は自然受粉家系、人工交配家系にかかわらず、家系別に造林しても、それまでの家系の区別を考慮しない林分にくらべて、木材性質のバラツキを大きく減少させる効果は期待できない。

すなわち、「品質管理型木材生産」を目標とする場合に、実生では家系によって苗木を管理しても、均一な木材の生産に関しては効果が期待できないことを示す結果となった。

そこで、次章で考察するクロン林業の優位性について研究し、「品質管理型木材生産」の実現に向けて、指針を具体化する必要を認めた。

5 クロン林業の選択

九州地域及び関西の一部地域では、スギはさし木で造林するのが一般的である。特に九州地域ではさし木苗は、スギ種苗生産量の97%を占め^(林木育種センター:1993年)、更新面積に占める比率も概ね種苗生産量の比率に近いと推測されている。したがって、九州地域ではクロンに関する育種効果の情報が林業の実態に即したものであるといえよう。

これまでの章で、実生で造林する場合、木材性質はこれまでの林木育種事業で得た成長形質に関する改良よりも高い育種効果が得られることがわかった。しかし、特定組み合わせ能力が高いので、育種効果を確実に得るためには特別な配慮を必要とすること、家系別に造林しても木材性質のバラツキを一般の実生林分から減少させる効果は少ないことも明らかになった。一方、クロンは親木の遺伝子型をそのまま受け継ぐので、両親の関与する実生とは異なって特定組み合わせ能力の影響を考慮することなく、優れた性質を確実に子供に伝えることができる。また、育種の見地から考えて、クロンは単一の遺伝子型で構成されているので、実生と異なって均一な木材生産にとって有利である。

そこで本章では、クロンの木材性質について、クロン別に植栽された試験地から採取した材の木材性質を調査する。その結果によって、クロンの木材性質に関する育種効果を明らかにするとともに、これまでに示した木材性質のバラツキの実態に対して、育種によるバラツキの制御の効果について検討する。

5. 1 結果

5. 1. 1 木材性質のバラツキについてクロンと実生との比較

本章では、さし木クロン別に植栽した試験地から採取した供試材5(地域差検定林)のなかの内之浦試験地から採取した材について、容積密度、心材含水率、ヤング率、胸高直径を測定した。

クロン平均値、クロン平均値間の標準偏差及び変動係数、全個体間の標準偏差、全個体間の変動係数をTable5-1に示す。クロンでは平均値間の変動係数と全個体間の変動係数の大きさの差が小さく、クロン別平均値間の変動係数と全個体間の変動係数の比は最も小さいヤング率が1であり、最も大きい辺材容積密度でも1.4と大差はなかった。クロンにおけるこれらの値を、実生における実生家系別平均値間の変動係数と全個体間の変動係数の比が2から3であったのにくらべると、1/2から1/3の小さな値である。表現型分散は遺伝子型分散と環境分散の合計であり、全個体のバラツキ(表現型分散)とクロン間のバラツキ(遺伝子型分散)の大きさに

ちがいが少ないことによって、クローン内のバラツキ（環境分散）が小さいことがわかる。

一方、性質別の全個体間の変動係数の大きさを比較すると、最も変動係数が大きかったのは心材含水率の29%であり、最も小さかったのは心材容積密度と辺材容積密度であって、それぞれ11%と10%であった。ヤング率と胸高直径は心材含水率と容積密度の中間の大きさを示し、ヤング率が21%、胸高直径が14%であった。全個体間の変動係数の大きさによる性質の比較結果は供試材1（一般実生林分）、供試材2（自然受粉家系）、供試材3（人工交配家系）と同じであり、しかも性質ごとの変動係数の大きさもほぼ同じであった。環境条件、家系数やクローン数、供試クローンや家系の構成の差があるが、12の精英樹クローンから構成されている供試材5（地域差検定林）の林分全体のバラツキが、多くの実生家系を含む供試材1、2、3の林分全体のバラツキと同じ大きさであった。このことから、成長形質や樹幹形に関する基準に基づいて選ばれてきた精英樹について、さらに利用に適した木材性質を備えた個体を選抜するのに十分な遺伝的変異の幅があると期待できる。

供試材5（地域差検定林）の内之浦の材において、クローン間の変異は全ての性質について実生家系間の変異よりも大きいことがわかった。このことは、木材性質を指標にして選抜したクローン集団の平均値と母集団平均との差、すなわち選抜差が実生家系における選抜差よりも大きいことが予測できる。性質ごとのクローン平均値の変異幅は次に示すとおりである。心材容積密度は東臼杵5の303kg/m³から宮崎署6の370kg/m³の範囲にあって、変異幅は67kg/m³であった。辺材容積密度は日出1の303kg/m³から竹田11の360kg/m³までの範囲にあって、変異幅は57kg/m³であった。心材含水率は福岡署2の103%から東臼杵5の216%までの範囲にあって、変異幅は113%であった。ヤング率は竹田11の38 kg f × 10³/cm²から八女12の72kgf × 10³/cm²までの範囲にあって、変異幅は34kgf × 10³/cm²であった。胸高直径は唐津6の13cmから球磨5の20cmまでの範囲にあって、変異幅は7cmであった。

このように、供試材5（地域差検定林）が示したクローン間の変異幅はどの性質においても大きく、供試材2（自然受粉家系）と供試材3（人工交配家系）の実生家系間の変異幅にくらべて2倍前後の大きさであった。

供試材5（地域差検定林）の内之浦試験地から採取した材の調査結果から、容積密度、ヤング率、心材含水率、胸高直径いずれの性質においても、クローン内のバラツキは小さく、クローン間の変異幅は供試材2（自然受粉家系）と供試材3（人工交配家系）の家系間差に比べて2倍以上の大きさを示すことがわかった。

Table 5-1 Clonal mean values, standard deviations and coefficient variances among clonal mean values, standard deviations and coefficient variances among all individuals for 21-year-old clonal test stand established at uchinoura.

No.	Clone names	WOS	WOH	MCH	Ed	DBH
1	Yame 12	351	341	123	72	18
2	Fujitu 24	308	354	193	64	16
3	Karatu 6	364	394	113	45	13
4	Fukuokasyo 2	326	377	103	44	17
5	Taketa 11	360	383	119	38	16
6	Hita 1	338	341	154	63	17
7	Hiji 1	303	361	156	66	16
8	Higashiusuki 5	317	303	216	45	19
9	Kuma 5	302	312	124	44	20
10	Aira 4	302	305	124	55	19
11	Kimotuki 2	359	329	192	55	19
12	Miyazakisyo 6	351	370	168	45	19
Total mean values		332	347	149	53	17
Standard deviations among clonal mean values		25	31	37	11	2
Coefficient variations among clonal mean values		7	9	25	21	11
Coefficient variations among all individuals		10	11	29	21	14

Legend : WOS: Wood density of sapwood, WOH: Wood density of heartwood, MCH: Moisture content of heartwood, Ed: Dynamic modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height.

5. 1. 2 クローンの木材性質に関する遺伝的母数

クローン苗は親の遺伝子型をそのまま受け継ぐので、供試材2と3の遺伝的母数を分析したように遺伝子型分散を相加的遺伝子型分散と非相加的遺伝子型分散に区分する必要がある。したがって、親クローンの優れた性質が子供クローンにつたわる確率は広義の遺伝率によって示される。以下に示す式5-1にしたがって、広義の遺伝率を計算した。

式5-1

$$h^2 = \sigma_c / (\sigma_c + \sigma_{ec} + \sigma_e) : \sigma_c = \sigma_a + \sigma_d$$

ここで、 h^2 ：広義の遺伝率、 σ_c ：クローンによる分散、 σ_e ：環境による分散、 σ_{ec} ：クローンと環境との交互作用による分散、 σ_a ：相加的遺伝分散、 σ_d ：非相加的遺伝分散、である。

供試材5（地域差検定林）の内之浦試験地の材について、遺伝率を計算するために性質ごとの分散分析を行い、その結果をTable5-2に示す。Table5-2には性質ごとの平均平方、F値、変動因別の分散成分、広義の遺伝率を併示した。

内之浦試験地では、どの木材性質についてもクローン間に0.1%あるいは1%水準の高い有意差が認められた。特にヤング率はクローン間のF値が46.8であり、他の性質のF値、心材含水率が17.2、心材容積密度が10.4、辺材容積密度が6.5、胸高直径が4.2にくらべて3～11倍の大きさであった。また、胸高直径についてのみクローンと反復の交互作用に有意差が認められた。

一方、広義の遺伝率が最も高かったのはヤング率の0.86であり、逆に広義の遺伝率が最も低かったのは胸高直径の0.44であった。その他の性質の広義の遺伝率は心材含水率が0.66、心材容積密度が0.60、辺材容積密度が0.51であり、ヤング率の遺伝率と胸高直径の遺伝率の中間の値を示した。また、ヤング率は先に示したようにクローン間の変異幅も大きいので、選抜差を大きくとることができる。したがって、広義の遺伝率と選抜差の積で

Table 5-2 Analysis of variance of wood properties for 21-year-old clonal test stand established at Uchinoura.

	Sources of variances	df	WOS	WOH	MCH	Ed	DBH
MS	Replications	2	336.0	381.0	233.0	46.8	15.5
	Clones	11	4569.9	6676.1	9854.3	869.7	25.7
	Interaction between clones and rep	22	375.6	473.7	755.5	23.9	6.1
	error	51	705.2	639.2	571.5	18.6	2.0
FV	Replications		0.5	0.6	0.4	2.5	7.8
	Clones		6.5 ***	10.4 ***	17.2 ***	46.8 ***	4.2 **
	Interaction between clones and rep.		0.5	0.7	1.3	1.3	3.1 ***
EVC	Clones		586.9	863.8	1261.8	117.4	2.7
	Interaction between clones and rep.		0.0	0.0	79.0	2.3	1.8
	error		705.2	639.2	571.5	18.6	2.0
Broad-sense heritabilities		(%)	51	60	66	86	44

Legend : MS: Mean squares, FV: F values, EVC: Expectations of variance components,
df : degree of freedom,
WOS: Wood density of sapwood, WOH: Wood density of heartwood,
MCH: Moisture content of heartwood,
Ed: Dynamic modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height,
: Significant at 1% level, *: Significant at 0.1% level.

表される遺伝獲得量が大きくなるので、高い育種効果を期待できることがわかった。

5. 2 考察

5. 2. 1 クローン林分における木材性質についての育種効果

実生では、採種園産の種子によって苗木を増殖する場合の育種効果について、遺伝分散のなかの相加的遺伝分散だけから得られる狭義の遺伝率に基づいて推定しなければならなかった。しかし、クローンを選抜する場合には親木のすべての遺伝分散を受け継ぐので、花粉親、採種親の効果を考慮する必要が一切なく、性質のすぐれた個体を選択することによって、より効果的な木材性質に関する育種をすすめることができる。

木材性質の相互間で育種効果を比較するために、性質ごとに12クローンの全平均に対する遺伝獲得量の比率を計算し、その値を改良率と定義してFig. 5-1に示す。値の望ましいほうから上位1σ（上位1/6）以内を選抜することを仮定して12クローンの中から2クローンを選抜した。上位クローンの選抜にあたり、容積密度、ヤング率、胸高直径では値の高いほうが望ましい性質であるとし、心材含水率は値の低いほうが利用上望ましい性質であるとした。その結果、改良率はヤング率が18%、心材含水率が16%の高い値を示した。ヤング率と心材含水率の改良率は胸高直径の改良率が8%、心材容積密度の改良率が7%、辺材容積密度の改良率が5%であったのくらべて2～4倍の大きさであった。

最も改良率の高いヤング率の遺伝獲得量は以下のとおりに計算される。選抜差は上位2クローンである八女12と日出1のそれぞれのヤング率、 $72\text{kgf}\times 10^3/\text{cm}^2$ と $66\text{kgf}\times 10^3/\text{cm}^2$ の平均値 $69\text{kgf}\times 10^3/\text{cm}^2$ と全平均値の $53\text{kgf}\times 10^3/\text{cm}^2$ の差 $15\text{kgf}\times 10^3/\text{cm}^2$ である。この選抜差 $15\text{kgf}\times 10^3/\text{cm}^2$ と遺伝率0.86（広義の遺伝率）の積である $13\text{kgf}\times 10^3/\text{cm}^2$ が遺伝獲得量である。

スギ材を構造用製材として利用することを仮定して利用面からヤング率の遺伝獲得量を評価すると、12クローンの全平均値 $53\text{kgf}\times 10^3/\text{cm}^2$ は「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」の「機械的等級区分製材」では最も下級のE50にランクされるが、上位2クローンを選抜することによって改良されたヤング率は $66\text{kgf}\times 10^3/\text{cm}^2$ であることが期待でき、これは「機械的等級区分製材」で1階級上のE70にランクされる値である。また、「木質構造設計基準」(日本建築学会:1995)ではE70以上を「普通構造材」としているの、改良前には「普通構造材」の対象にならなかったものが、改良によって「普通構造材」の対象となることを意味する。このように、例えば構造用製材としての利用を仮定した場合、クローンのヤング率についての育種効果は利用面の客観的な品質基準にもとづいて評価することができた。しかし、実生家系では、同じヤング率についても、狭義の遺伝率が0.14と低く、クローンの場合同様に上位1/6の選抜率を仮定して遺伝獲得量を計算しても $2\times 10^3/\text{cm}^2$ と「機械的等級区分製材」の尺度で評価できないくらいに小さい。このように、ヤング率を例にとっても実生では育種効果が小さく、そのため

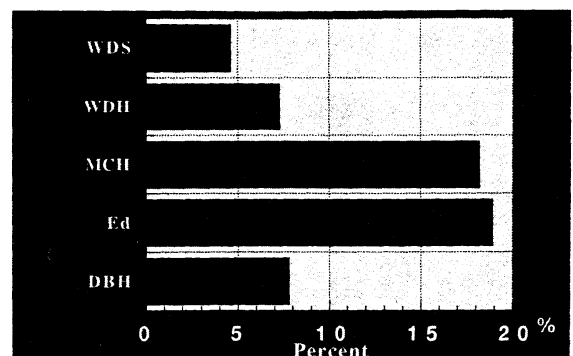


Fig. 5-1 Percentages of genetic gains for clones ranked to higher level (upper one sixth of population) to total mean value of wood properties.

Legend : WOS : Wood density of sapwood, WOH : Wood density of heartwood, MCH : Moisture content of heartwood, Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height.

に利用上の品質基準によって育種効果を評価することができなかった。

一方、心材含水率については広義の遺伝率、遺伝獲得量ともにヤング率で得られた結果に近い大きな値が得られており、遺伝獲得量として 25% 心材含水率を低下させることが期待できる。将来、乾燥特性はじめ、最終用途の基準にしたがって、それぞれの木材性質について具体的に育種効果を評価することも可能である。また、容積密度については胸高直径以上に広義の遺伝率が高いが、変異幅が小さいために遺伝獲得量は胸高直径と同じかあるいは劣るという結果になった。しかし、パルプ利用を前提にした場合に、成長量の改良と組み合わせることで木材実質の収量をより効果的に改良できる可能性が明らかになった。現在はスギをパルプ原料として利用することはまだ少ないが、将来、利用面の状況が変化した場合には今回の研究の成果を活かせる可能性がある。

このように、クローンの木材性質、とくにヤング率に関しては高い育種効果が得られ、それは利用上の木材品質表示の基準、例えば「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」の「機械的等級区分製材」においても育種効果によりランクを上昇させることを具体的に示すことができた。

5. 2. 2 クローン林分における木材性質のバラツキの育種による制御

単一クローンによって造林された林分は単一の遺伝子型で構成されているので、両親が関与するために遺伝子型の構成がより複雑になる実生林分とくらべて、性質のバラツキが小さいことが期待できる。このことについて、本章におけるクローンの性質のバラツキと前章における実生の性質のバラツキとの比較・検討の結果から考察する。

供試材全体の変動係数は、胸高直径を除くいずれの性質においても家系を区分しない一般の実生林分で示す変動係数とほぼ同程度の大きさを示した。この結果によって、さし木林分の木材性質は、複数の品種を含めた場合に実生林分と同等の大きな変異幅を示すことがわかった。また、精英樹クローンは成長量、樹幹形態などについて選抜を受けており、遺伝的な多様性を減少させていると考えられるにもかかわらず、木材性質に関して一般の実生林分と同等のバラツキを示すことは、木材性質に基づいて優れたクローンを選抜する余地を残していると言えよう。Libby は近縁な親木から構成された採種園産の苗木よりは、近縁関係に十分配慮して選択した少数のクローン集団の方がより大きな遺伝子型の多様性を期待できると指摘しており^(Libby:1982)、本研究結果からも近縁度に注意をはらいつつ選抜したクローンの方が遺伝的多様性を維持できるとも考えられた。今回供試した 12 クローンの精英樹集団が多くの家系を含む実生林分に相当する変異を持っていたこともこのことを裏付けるものである。これらの結果によって、成長に優れた精英樹からさらに望ましい木材性質を備えた精英樹を選抜することによって、成長、樹形、木材品質ともに優れた造林木を創り出すことが可能であるといえる。

一方、クローンに関する木材性質のバラツキの実態として、Table5-2 に基づいて計算した変動因別の分散寄与

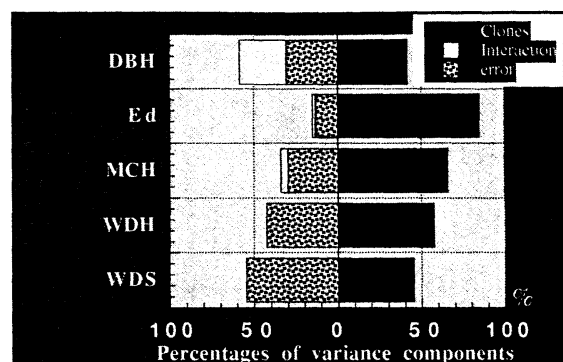


Fig. 5-2 Percentages of variance components for wood properties on plus-tree clones.

Legend : WOS : Wood density of sapwood, WOH : Wood density of heartwood, MCH : Moisture content of heartwood, Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height.

率を Fig. 5-2 に示す。本章の第1節1項でのべたように、供試材全体の変動係数は、胸高直径を除くいずれの性質においても家系を区分しない一般の実生林分の変動係数とほぼ同程度の大きさであった。Fig. 5-2 において、クローン別に造林することによって一般実生林分からのバラツキの減少を期待できるのは、クローン間の分散寄与率である。この図では対比を明確にするため、クローン間分散の寄与率を図の右方向に正の値として、誤差分散およびクローンと反復の交互作用の寄与率を図の左側の方

向に負の値として表した。クローンではいずれの性質においても、クローン間の分散が大きく、誤差、交互作用は小さいことがわかる。とくに、ヤング率について、クローン間分散の寄与率は86%であり、誤差および反復とクローンの交互作用の寄与率に関しては両者を合わせてもわずか14%にすぎない。クローンでは誤差と交互作用が極めて小さいことを具体的に示すため、誤差と交互作用の寄与率の合計が最も小さいヤング率について、前章で得られた自然受粉家系（半兄弟家系とする）と人工交配家系（全兄弟家系とする）それぞれにおける家系間分散の寄与率と誤差と交互作用の寄与率の合計をクローンと対比して Fig. 5-3 に示す。全兄弟家系、半兄弟家系ともに実生のヤング率では誤差分散と交互作用分散の寄与率の合計は80%以上を占めており、これらと比べるとクローンの誤差分散と交互作用分散の寄与率の合計は1/6の大きさである。全クローンを含めたバラツキと全家系を含めたバラツキは同じ大きさであることは5.1でのべたとおりである。環境条件、家系数やクローン数、供試精英樹などの条件の差があるので、単純に結論できないが、単一クローンで造林することを仮定すると、クローン間の分散は考えなくて良いので、誤差分散と交互作用分散がすべて残ったとしても実生にくらべて極めてバラツキが小さくなるといえよう。実際に大規模なユーカリのクローン林業を行っているブラジルにおいても、クローン林業の重要な利点の一つが均一な木材生産であることを認めている^(Zobel B. J.:1993) こともこれを裏付けるものである。

このように、単一クローンで造林した場合にはバラツキが極めて小さくなり、この傾向はとくにヤング率で顕著であった。また、クローンのヤング率は構造用製材としての利用を仮定すると、遺伝獲得量によってあらわされる育種効果は利用面における実際の品質表示によって具体的に評価できるものであった。したがって、利用に適した性質を持ち、しかも性質が均一な木材の生産を意図した造林、いわゆる「品質管理型木材生産」の可能性を示唆するものである。

ところで、育種的な研究成果を実際の事業に結びつけて林業に活かしていくには、いわゆる「種苗の配布区域」の問題がある。選抜したクローンによる種苗について、期待した性質を発揮する地域の範囲を明らかにし、種苗の適用範囲を明らかにしておかなければならない。本章で得られた成果は単一林分から得られた結果であり、これが他の林分、地域で適用できるのが成果を実際に利用するうえで重要な問題となる。したがって、次の章において育種成果の利用をめざした複数検定林による検討が必要であることを認めた。

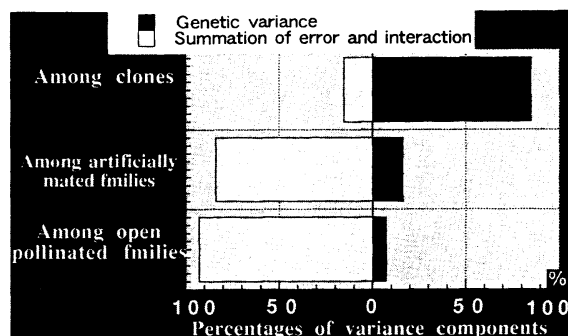


Fig. 5-3 Comparison of percentages of variance components for the dynamic modulus of elasticity among propagating methods.

Legend : WOS : Wood density of sapwood, WOH : Wood density of heartwood, MCH : Moisture content of heartwood, Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height.

5. 3 結論

本章における供試材5（地域差検定林）の内之浦試験地の材によるクローンの木材性質に関する考察によって次に示す事項がわかった。

- (1) クローンの木材性質はクローン間の変異は大きく、逆にクローン内の変異は小さい。また、広義の遺伝率が高い。したがって、高い育種効果が期待できる。
- (2) クローンの木材性質はクローン間の分散寄与率に比べて誤差分散と交互作用分散の寄与率の合計が小さい。とくに、ヤング率は14%と極めて小さい。したがって、クローン別に造林したばあい、バラツキを減少させる高い効果を期待できる。
- (3) (1), (2)項の結果によって、育種によって性質を木材利用により適したものに改良し、また、木材性質ができるだけ均一になるように林木を保育するためには、実生よりもクローンの方がより適していると言えた。

クローンに基づく育種技術を導入することによって、ヤング率は、利用面における実際の品質表示である「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」の「機械的等級区分製材」に対して、等級を1ランク引き上げる具体的な育種効果が得られた。しかも、先に示したように、単一クローンのヤング率はバラツキが極めて小さい。このことは、例えば構造用製材としての利用を指向したばあい、ヤング率は材質指標として、育種、利用の両面から最も効果的であると言える。これらの結果を具体的な成果に結びつけるには、例えば構造用製材を指向した木材生産について、クローンに基づく育種技術を導入し、ヤング率を材質指標として「品質管理型木材生産」を行う可能性を示唆する。

したがって、本章で得たクローンとヤング率に関する育種の考察の成果を実際の林業に結びつけるため、構造用製材としての利用を仮定したクローン林業による「品質管理型木材生産」についての実証的な検証を行う必要を認めた。

6 クローンに関する育種効果の林業への適用の検討

これまでの章において、クローンは木材性質に関する育種効果が高く、しかもクローン内では性質のバラツキが小さいことを示した。とくに、ヤング率についてはその傾向が顕著であった。需要者が木材に望むのは、利用するうえで有利な木材性質と均一な性質の木材である。そこで、これまでに得られたクローンの木材性質に関する育種学的成果を利用し、利用者サイドから望まれる木材の生産に寄与する方法について考察する。

利用に適した木材の生産、いわゆる「品質管理型木材生産」に育種が寄与する可能性について、クローンのヤング率は育種効果が高くバラツキも小さいが、利用面において構造用製材としての重要な材質指標でもあることに着目し、例えばクローン林業によって構造用製材に適したスギ材を生産することを仮定することで検討を試みる。この場合、遺伝率が親と子供の似かよる確率を示すものであることに基づいて、造林に用いる種苗のオルテットの特性から収穫時の実際の木材の特性を推定する。その推定値によって、造林者は種苗の選択が有利になり、木材工業では原材料の購入に際してリスクを減らすことができ、しいては「品質管理型木材生産」をより具体的にすることができる。また、九州ではスギはさし木で造林するのが一般的であり、この点においてクローンの育種効果は九州の林業の実態に即したものといえよう。

一方、育種的研究成果を実際の林業に応用するうえで、クローンが同じ性質を発揮できる地域の区分が重要な要素になるであろう。例えば、ある性質について優秀なクローンを選抜してもそれが限られた地域でしか能力を発揮できないのであれば、クローンを地域ごとに選抜しなければならなくなって、育種事業に多くのコストが必要になる。しかし、広い地域で能力を発揮できれば選抜の省力化につながり、コストが低下する。

これらのことから、本章では供試材5、すなわち九州地方を網羅するように配置された地域差検定林から選択された6ヶ所の林分の材によって、ヤング率のクローンと地域のちがいによる変異を検討する。さらに、遺伝率は親と子が似かよる確率を示すものであることを利用し、親クローンのヤング率から、収穫された木材の実際のヤング率を推定する方法について考察する。

6. 1 結果

6. 1. 1 ヤング率と胸高直径のクローン間変異および林分間変異

供試材5（地域差検定林）について、ヤング率と肥大成長の指標として胸高直径を調査した。ヤング率と胸高直径のクローンごと、林分ごとの平均値、標準偏差、変動係数を Table 6-1 に示す。なお、供試数は3(本)×12(ク

Table 6-1 Mean values of dynamic modulus of elasticity and diameters at breast height in a clone and a stand.

Item No.	Clone	Stands						Total of 6 stands			
		Nagasaki	Kusu	Kikuchi	Yabe	Kobayashi	Uchinoura	Mean	STD	CV(%)	
(unit : t/cm ²)											
Ed	1 Yame 12	69.3	58.4	58.5	56.8	60.8	71.9	62.6	6.37	10.17	
	2 Fujitu 24	62.4	53.8	61.2	56.5	57.2	64.4	59.2	4.06	6.85	
	3 Karatu 6	45.6	41.6	49.2	41.5	44.8	44.5	44.5	2.87	6.45	
	4 Fukuokasyo 2	43.6	39.9	43.2	31.6	41.0	43.7	40.5	4.63	11.42	
	5 Taketa 11	32.9	37.0	42.5	25.2	30.3	37.5	34.2	6.09	17.78	
	6 Hita 1	48.0	55.7	67.5	54.8	58.2	63.4	57.9	6.86	11.84	
	7 Hiji 1	70.8	63.4	70.2	59.6	61.1	66.2	65.2	4.66	7.15	
	8 Higashiusuki 5	48.3	39.9	46.9	38.7	39.9	45.4	43.2	4.15	9.62	
	9 Kuma 5	41.7	41.7	44.4	34.6	41.9	44.4	41.5	3.59	8.65	
	10 Aira 4	53.3	53.0	54.2	51.9	47.6	55.2	52.5	2.66	5.06	
	11 Kimotuki 2	48.5	46.8	47.1	41.0	44.5	54.8	47.1	4.59	9.74	
	12 Miyazakisyo 6	47.7	44.7	51.1	39.6	43.4	45.4	45.3	3.89	8.58	
	Total of 12 clones										
	Mean		51.0	48.0	53.0	44.3	47.6	53.1	49.5	3.46	7.00
	STD		11.25	8.57	9.41	11.27	9.69	11.16	9.82		
	CV(%)		22.06	17.85	17.75	25.43	20.38	21.04	19.84		
(unit : cm)											
DBH	1 Yame 12	17.8	21.8	19.8	15.9	20.1	18.0	18.9	2.08	11.00	
	2 Fujitu 24	15.2	21.6	20.7	14.2	19.8	16.4	18.0	3.10	17.24	
	3 Karatu 6	12.7	17.3	17.0	13.9	13.7	13.3	14.6	1.98	13.55	
	4 Fukuokasyo 2	15.0	17.6	15.6	12.7	19.1	17.3	16.2	2.27	13.99	
	5 Taketa 11	14.1	18.6	18.9	14.9	14.7	15.8	16.1	2.07	12.86	
	6 Hita 1	17.0	22.1	21.2	14.4	18.3	16.5	18.2	2.94	16.13	
	7 Hiji 1	15.0	20.9	18.3	16.2	17.7	15.7	17.3	2.16	12.53	
	8 Higashiusuki 5	17.6	21.2	19.8	14.8	18.6	19.1	18.5	2.19	11.84	
	9 Kuma 5	19.3	23.6	24.0	15.6	21.5	19.6	20.6	3.13	15.20	
	10 Aira 4	19.2	22.0	23.0	16.4	24.3	19.3	20.7	2.94	14.24	
	11 Kimotuki 2	18.3	20.6	20.3	15.9	21.0	18.7	19.1	1.93	10.07	
	12 Miyazakisyo 6	18.5	21.2	20.0	14.8	19.6	18.5	18.8	2.21	11.75	
	Total of 12 clones										
	Mean		16.6	20.7	19.9	15.0	19.0	17.3	18.1	2.16	11.95
	STD		2.18	1.93	2.32	1.08	2.86	1.89	1.79		
	CV(%)		13.08	9.30	11.69	7.22	15.04	10.88	9.91		

Legend : STD : Standard deviation, CV : Coefficient of variation,

Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height.

ローン)×3(反復)×6(林分)=648本である。

ヤング率の6林分の全測定値によるクローン別平均値は竹田11の 34×10^3 kgf/cm²から日出1の 65×10^3 kgf/cm²までの範囲にあり、変異幅は 31×10^3 kgf/cm²、変動係数は20%であった。しかし、ヤング率の林分ごとの全平均値は矢部の 44×10^3 kgf/cm²から内之浦の 53×10^3 kgf/cm²までの範囲にあり、

変異幅は 9×10^3 kgf/cm²、変動係数は7%とクローン間の場合よりも小さくなっている。ヤング率の林分平均値の変異幅はクローン平均値の変異幅の1/3であり、林分間の変動係数はクローン間の変動係数の1/2であった。これらの結果から、ヤング率の変異幅について、クローン間に比べて林分間が小さいことがわかった。

一方、胸高直径はヤング率で示された結果とは異なり、林分間の変動係数がクローン間の変動係数を上回った。胸高直径の6林分の全測定値によるクローン別平均値は福岡署2の14.7cmから始良4の20.7cmまでの範囲にあり、その変異幅は6.1cm、変動係数は10%であった。しかし、胸高直径の林分ごとの全平均値は矢部の15.0cmから玖珠の20.7cmまでの範囲にあり、その変異幅は5.7cm、変動係数は12%であった。胸高直径の林分平均値間の変異幅はクローン平均値間の0.93倍、林分間の変動係数はクローン間の変動係数の1.2倍の大きさであった。このように、胸高直径ではクローン間と林分間の変異幅がほぼ同じであり、しかも林分間の変動係数がクローン間の変動係数に比べて大きい結果を得た。

クローン別平均値の有意差を検定し、また、後の項において遺伝率、分散の変動因別寄与率を計算するために、ヤング率と胸高直径の調査結果について6林分を込みにして分散分析をおこない、その結果をTable 6-2に示す。ヤング率、胸高直径ともにクローン間変異は0.1%水準で有意であり、特にヤング率のクローン間変異の有意水準を示すF値は52.1であり、胸高直径のF値12.6とくらべて4倍の大きさである。同じように、林分間変異についてもヤング率、胸高直径ともに有意差が認められた。しかし、林分間差の有意水準を示すF値は胸高直径で29.5であり、ヤング率のF値19.2とくらべて1.5倍の大きさであった。

6. 1. 2. ヤング率と胸高直径に関するバラツキの原因別分割

5における供試材5(地域差検定林)の検討結果から、クローンのヤング率のバラツキについて、クローンの分散寄与率が85%と高く、遺伝的に強く支配されていることがわかった。しかし、このことに基づいてクローンに関する育種的研究成果を林業に应用するためには、木材性質に関する遺伝的な支配が林分によって大きく異なるのではないかと危惧を取り除いておかなければならない。そこで、供試材5によってクローン間、林分間、林分内の反復、クローンと林分の交互作用、クローンと林分内反復との交互作用の要因別に木材性質のバラツキの大きさを検討した。具体的には6林分を込みにしたヤング率と胸高直径のバラツキに関して、要因別の大きさを分散寄与率から検討した。Table 6-2に示した平均平方について、それぞれの分散の自由度と原因別の期待成分

Table 6-2 Analysis of variance of wood properties based on six clonal test stands in Kyushu.

Sources of variances	df	Mean squares		F values(1)		F values (2)	
		Ed	DBH	Ed	DBH	Ed	DBH
Stands	5	1294.9	505.0	19.2 **	29.5 ***	-	-
Replication in a stand	12	67.4	17.1	2.2 ns	-	-	2.1 ns
clones	11	5233.3	174.3	-	-	52.1 ***	12.6 ***
Interaction 1	55	100.4	13.8	3.3 ***	3.4 ***	-	-
Interaction 2	132	38.7	8.2	1.3 ns	2.0 **	-	-
error	432	30.1	4.0	-	-	-	-

Legend: **, Significant at 1% level, ***: Significant at 0.1% level, n.s.: Non - significant,
Ed: Dynamic modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height,
df: Degree of freedom,
Note: Interaction 1: Interaction between Clones and stands,
Interaction 2: Interaction between clones and replication in a stand,
F value(1): Ratio of mean squares divided by the error,
F value(2): Ratio of mean squares divided by the interaction 1.

を Table 6-3 に示す。この Table 6-3 に基づき、Table 6-2 の平均平方から、ヤング率、胸高直径それぞれの変動因別の分散成分を計算し、分散成分の合計値に対する分散成分の比率である分散寄与率を計算して Fig. 6-1 に示す。

ヤング率では、クローン間分散の寄与率が65%であったのに対して林分間の分散寄与率は7%であり、クローン間分散は林分間分散の9倍の大きさがあった。一方、胸高直径はクローン間分散の寄与率が21%、林分間分散の寄与率が33%であり、ヤング率の場合とは逆に林分間分散の寄与率がクローン間分散の寄与率の1.5倍の大きさを示した。また、林分とクローンの間の交互作用、反復間、反復とクローンの交互作用などクローン間以外の全ての分散寄与率の合計について、ヤング率では全体の35%を占めるのに過ぎないが、胸高直径では79%を占める。とくにクローンと林分、クローンと林分内の反復の交互作用分散の寄与率が胸高直径では15%であったのにくらべてヤング率では7%と小さい。

このように、ヤング率ではクローンのちがいに起因するバラツキが林分の差や交互作用にくらべて大きいことを示す結果を得ており、この性質が地域的な環境のちがいよりもクローンのちがいによってより強く影響されていることがわかった。

6. 1. 3 クローンと林分の交互作用及び検定林間の相関関係

性質のバラツキについて、ヤング率では7%、胸高直径では15%が交互作用によるものであった。交互作用は、主効果であるクローン、林分、反復について、林分ごとのクローンの変化、反復ごとのクローンの変化がすべ

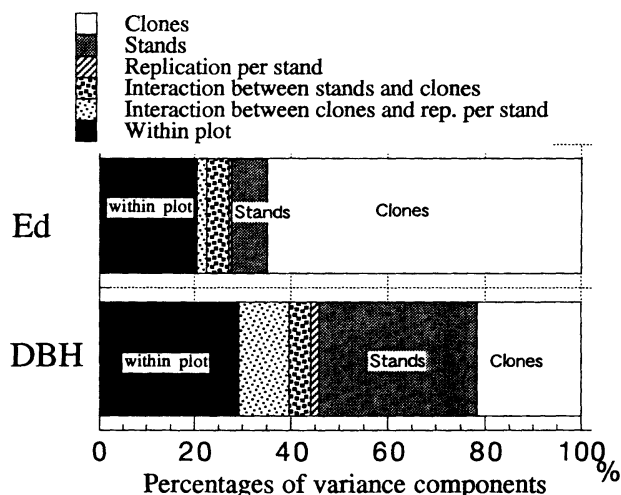


Fig. 6-1 Portioning of variances of Ed and DBH.

Legend : Ed : Dynamic modulus of elasticity. DBH : Diameter at breast height.

Table 6-3 Expected variance components in a combined analysis of variance of six test stands.

Sources of variances	df	Expected variance components
Stands	5	$V_w + 3.02V_{cr} + 9.06V_{cs} + 36.06V_r + 108.00V_s$
Replication in a stand	12	$V_w + 3.02V_{cr} + 35.95V_r$
clones	11	$V_w + 3.02V_{cr} + 8.99V_{cs} + 53.97V_c$
Interaction 1	55	$V_w + 3.02V_{cr} + 8.99V_{cs}$
Interaction 2	132	$V_w + 2.99V_{cr}$
error	432	V_w

Legend : df : Degree of freedom,
 Vc : Expected variance component of clones,
 Vs : Expected variance component of stands,
 Vr : Expected variance component of replications in a stand,
 Vcs : Expected variance component of interaction 1
 Vcr : Expected variance component of interaction 2
 Vw: Expected variance component of error.
 Note : Interaction 1: Interaction between Clones and stands,
 Interaction 2 : Interaction between clones and replication in a stand.

Table 6-4 Analysis of variances according to Everheart and Russell's method based on six clonal test stands.

Items	Sources of variances	df	Sums of squares	Mean squares	F value
Ed	Clones	11	6366.4	578.8	
	Environment	60	1329.2		
	Environment	1	197.8		
	Clones x Environment	11	569.3	51.8	4.4 *
	error	48	562.1	11.7	
Total		71	7695.6		
DBH	Clones	11	211.2	19.2	
	Environment	60	360.9		
	Environment	1	26.6		
	Clones x Environment	11	271.0	24.6	18.7 **
	error	48	63.2	1.3	
Total		71	572.1		

Legend : ** : Significant at 1% level, * : Significant at 5% level,
 Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height,
 df : Degree of freedom.

ておなじならば、交互作用は無い。しかし、林分ごとの平均値の高い、低いと特定のクローンの平均値の高い、低いと全く異なった傾向を示す場合、あるいは林分ごとの平均値に変化がなくとも、特定のクローンが林分ごとに大きな変化を示す場合に大きな交互作用が認められる。すなわち、ある性質について交互作用が大きいときには、林分ごとにクローンを選抜しなければならないこともありうる。

このように、評価したクローンの性質の適用範囲を決定するうえで林分とクローンとの交互作用の影響もまた重要な要素であり、交互作用について、エバハートとラッセルの方法によって分析した。これは性質の林分平均値に対する林分ごとのクローンの平均値の回帰係数によって分析するものである。ある性質について解析した結果、特定クローンの回帰係数が高い値であれば、このクローンは林分による性質の変化が大きいことを意味し、回帰係数が低いクローンは林分による性質の変化が少ないことがわかる。

エバハートとラッセルの手法によるヤング率、胸高直径の分散分析の結果を Table 6-4 に示す。また、同手法によるクローンごとの回帰係数を Table 6-5 に示す。分散分析結果は乱塊法としての分散分析結果同様、ヤング率、胸高直径ともにクローンと林分の交互作用は有意となり、環境指数に対する回帰係数に有意差があることがわかった。しかし、胸高直径の回帰係数間の F 値 18.7 は、ヤング率の F 値 4.4 とくらべて 4 倍以上の大きさである。

ヤング率についての回帰係数は、唐津 6 の 0.62 から竹田 11 の 1.47 までの範囲、胸高直径は唐津 6 の 0.71 から八女 12 の 1.90 までの範囲で変異し、

胸高直径に関する回帰係数が、ヤング率の回帰係数よりも変異幅が大きい。これらの回帰係数によるクローン別の回帰直線を Fig. 6-2 に示す。直線は 12 クローン全てについて表示したが、このうちヤング率に関する 6 林分の

Table 6-5 Regression coefficients and mean values of Ed and DBH according to Eberhart and Russell's method.

No. Clone names	Ed		DBH	
	AV	RC	AV	RC
1. Yame 12	63	1.1	19	1.9
2. Fujitu 24	59	0.9	18	1.4
3. Karatu 6	45	0.6	15	0.7
4. Fukuokasho 2	41	1.2	16	0.7
5. Taketa 11	34	1.5	16	0.7
6. Hita 1	58	1.0	18	1.3
7. Hiji 1	65	1.1	17	0.8
8. Higashiusuki 5	43	1.0	19	0.9
9. Kuma 5	41	0.9	21	1.4
10. Aira 4	53	0.5	21	1.2
11. Kimotuki 2	47	1.1	19	0.8
12. Miyazakisho 6	45	1.0	19	1.0

Legend: AV: Average values, RC: Regression coefficients.

DBH : Diameter at breast height,

Ed : Dynamic modulus of elasticity.

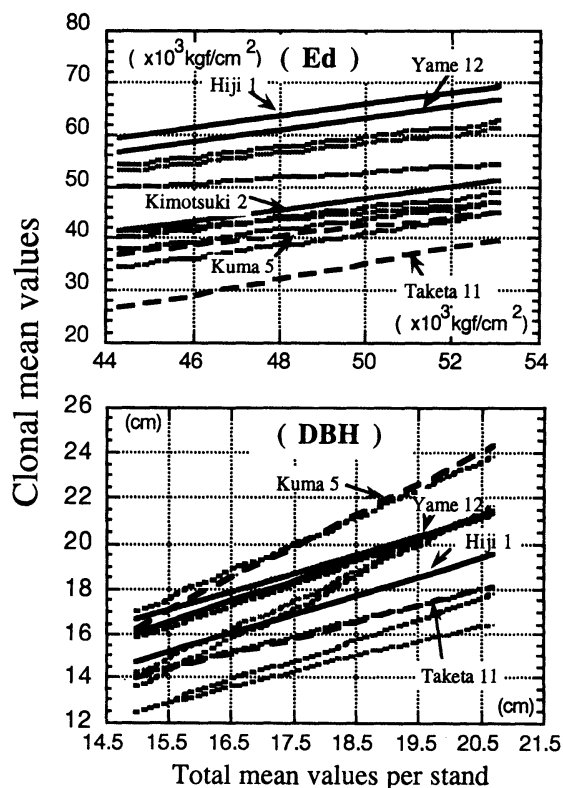


Fig. 6-2 Regression lines of twelve clones to total mean values per stand in the dynamic moduli of elasticity and diameters at breast height.

Legend : Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height.

全測定値の平均値が最も大きい日出1と八女12、逆に最も低い竹田11、および中間の値をとる肝属2と球磨5の回帰直線については、図中にそれぞれのクローン名を記した。ヤング率に関する回帰直線は傾きが小さいうえにクローン間の変異幅が広く、しかも互いにほぼ平行である。一方、胸高直径に関する回帰直線は傾きが大きいうえにクローン間の変異幅が狭く、しかも回帰直線が相互に交差しているクローンは八女12をはじめとして多く認められる。直線が交差していることは、胸高直径の大小によるクローンの順位が林分によって変化することであり、このことは林分とクローン間の大きな交互作用を起こす原因の一つである。

エバハートとラッセルの手法による交互作用の分析によって、分散分析から求めた交互作用はヤング率、胸高直径ともに有意であったが、回帰直線による分析によって、回帰直線が水平に近いことから林分ごとの変化が少なく、しかもヤング率の大小によるクローンの順位が林分によって大きく変わることはないという結果を得た。また、ヤング率では林分に関係なく常に高い値を示すが、胸高直径については林分のちがいによる影響が強い八女12のようなクローンが存在することもわかった。

このように、ヤング率では林分とクローンとの交互作用による影響が小さく、どの林分においても同様の評価が得られることが期待できる。さらに、クローンのヤング率と胸高直径に関し、林分が異なっても同じ評価が得られるのかについて、林分の相互間で算出した性質別の相関係数から検討した。相関係数を各林分間の距離に対する従属変数とし、林分間の距離は林分

ごとの経度、緯度、標高の差として Fig. 6-3 に散布図を示す。散布図中の性質ごとの値は6検定林から2検定林を抽出して相関係数を計算した全組み合わせ数の15に対応している。

Fig. 6-3 に示されるように、胸高直径の相関係数は0.41 から0.93 と変異幅が大きい、ヤング率の相関係数は0.78 から0.96 と変異幅が小さく、林分間の距離に関係なく常に高い正の相関係数を示した。さらに相互間の変動に対して回帰がどれほど寄与しているのかについて、相関寄与率（相関係数の自乗値）によって比較すると、最も低い相関寄与率はヤング率が61%であり、胸高直径の17%とくらべると3倍以上の大きさである。この結

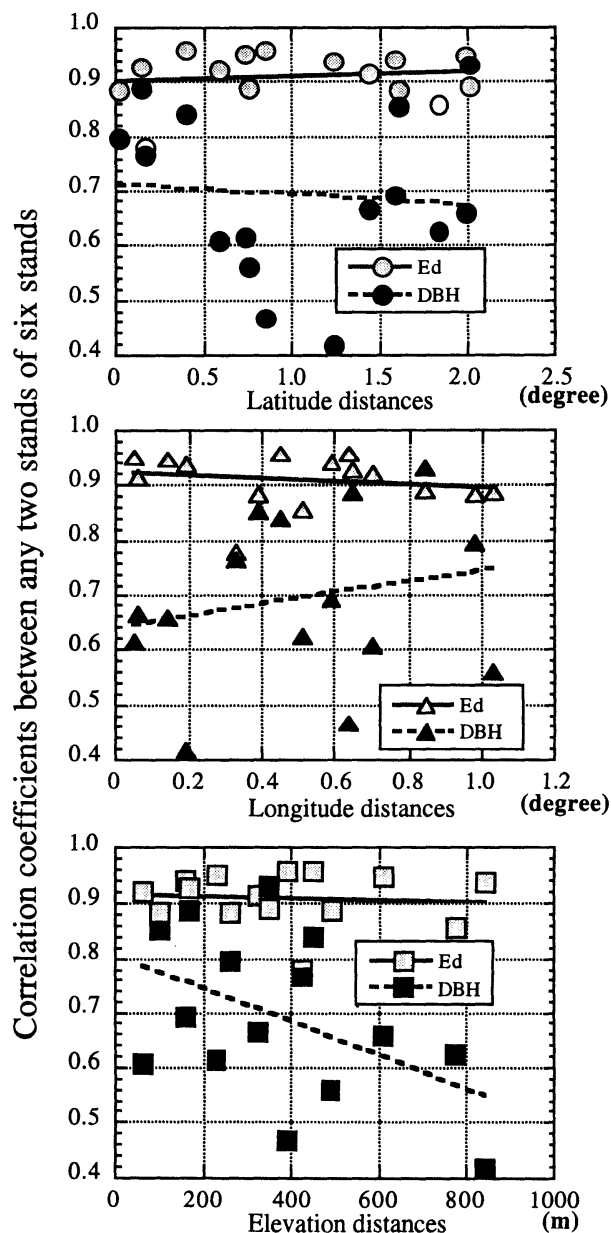


Fig. 6-3 Relationship between correlation coefficients and distance values in pairs of stands.

Legend : Ed : Dynamic modulus of elasticity, DBH : Diameter at breast height.

果からも、クローンのヤング率は環境のちがいによる影響をうけにくく、林分が異なっても同じ結果が得られることが明らかである。

6. 2 考察

6. 2. 1 クローンのヤング率と胸高直径の複数林分を含めた育種効果

育種効果は選抜差と遺伝率の積である遺伝獲得量で表され、母集団の平均値と遺伝獲得量の合計が育種技術による改良で期待される平均値である。供試材5（地域差検定林）のヤング率について林分別に求めた広義の遺伝率は0.60～0.86でありこれらは容積密度、心材含水率、胸高直径とくらべて高い値であった。また、5. 2で示したように、林分ごとの遺伝獲得量から期待されるヤング率の向上は「機械的等級区分」を一段階引き上げるものであった。これらの成果はクローンのヤング率について育種技術によって効果的に操作できる可能性を示すものであるが、林分ごとにそれぞれ個別に得られたものであり、実際の育種事業の対象となる広い地域の他の林分に適用できることを保証するものではない。そこで、供試材5（地域差検定林）の6林分を込みにして広い範囲に拡張した遺伝率を本研究において定義し、これによって広い範囲に適用できる育種効果を検討した。広い範囲に適用できる広義の遺伝率は式6-1にしたがって求めており、これは分母の環境分散としてプロット内の誤式6-1

$$h^2 = \sigma_c / (\sigma_c + \sigma_{sc} + \sigma_{rc} + \sigma_p)$$

ここで、 h^2 ：広義の遺伝率、 σ_c ：クローンによる分散、 σ_{sc} ：クローンと林分との交互作用による分散、 σ_{rc} ：クローンと林分内反復との交互作用による分散、 σ_p ：プロット内の分散である。

差分散に加えて林分とクローンとの交互作用分散をくわえることによって6林分を含めた環境分散を考慮したものである。さらに、供試材5（地域差検定林）の6林分による広義の遺伝率と6林分の全平均値から求めた選抜差によって、広い範囲に適用できる遺伝獲得量を計算した。選抜率は5. 2に同じく、ヤング率の大きさによる順位づけで上位1/6に入る2クローンを選抜するものとした。このようにして求めた広義の遺伝率、選抜差、遺伝獲得量、遺伝獲得量／母集団平均値をTable 6-6に併示する。6林分を込みにしたヤング率の広義の遺伝率は0.7であり、広い範囲に適用できる遺伝獲得量は $10\text{kgf} \times 10^3/\text{cm}^2$ であった。6林分を込みにした12クローン全体の平均値は $50\text{kgf} \times 10^3/\text{cm}^2$ なので、遺伝獲得量によって期待できる改良後の平均値は $60\text{kgf} \times 10^3/\text{cm}^2$ である。この改良効果を「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」の「機械的等級区分」によって評価すると、改良前にはE 50であったものが、改良によってE 70に1段階上げされることになる。この成果は5. 2に示した林分ごとの改良効果とおなじであった。すなわち、クローンのヤング率に関する林分ごとの改良効果は、6林分を込みにした広い範囲に拡張しても同じ改良効果が得られる

Table 6-6 Genetic gains for two clones ranked to height grades (upper one sixth of tested twelve clones) on six clonal test stands.

Highly ranked two clones based on total means of six stands. (Unit: $\times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$)	Ed
1 Hiji 1	65
2 Yame 12	63
Mean values for selected two clones	64
The total mean value	49
Selection difference	14
Broad sense heritability	0.70
Genetic gain	10
Percentage of the genetic gain to the total mean	20
Improved mean value	60

Legend: Ed: Dynamic modulus of elasticity.

ことがわかった。

供試材5（地域差検定林）は島原半島、玖珠山麓、阿蘇山麓、九州中央部の脊梁山脈、霧島山麓、大隅半島南部から採取されている。これは3. 2のFig. 3-1に示すように、九州を東西南北にほぼ網羅するものである。このように広い範囲を含めた木材性質の遺伝的変異は本研究において初めて検討されるものである。この結果によって、これら6林分を込みにしたヤング率は、実際の利用面の基準に基づいた品等を1段階上げる遺伝獲得量が期待できることがわかった。このことによって、クロー

ンでは広い範囲を一つの経営単位として育種成果の適用が可能になる見通しをつけた。その場合、九州では利用目的に適した性質を持つクローンを全体で一括して選抜すればよく、しいては育種にかかるコストを低くおさえることにもつながる成果である。

このように、クローンのヤング率は九州全体を含める広い範囲で、高い育種効果が得られることがわかった。

現在実施されている育種事業ではスギ、ヒノキの材積成長について8%以上の改良効果が期待できるとされている（林木育種センター内部資料）。さらに本研究結果によって、今後の育種事業にヤング率についてのクローン選抜を組み入れるのならば、20%を越える改良効果を期待できることが明らかになった。

成長に関する特性と木材性質が遺伝的に独立したものであるのなら、生長量を改良した集団についてさらに木材性質に関する改良をくわえることによって、成長にすぐれ、しかも利用に適した木材性質を備えた品種が創出できる。このことを、肥大成長の指標である胸高直径とヤング率の相関係数によって検討した。Fig. 6-4は6林分の全平均値による散布図を示したものであり、ヤング率と胸高直径の間には有意な相関関係は全く認められない。同様に林分ごとにおいても胸高直径とヤング率の間には有意な相関係数は認められず、胸高直径とヤング率が独立した性質であることを示す結果が得られた。このことによって、ヤング率が高く、しかも肥大成長に優れたクローンを選抜できる可能性があることがわかり、Fig. 6-4に示した八女12、日田1などのクローンはヤング率、胸高直径ともに平均以上の値を示すことが期待できる。

6. 2. 2 クローンと林分によるヤング率と胸高直径の変動

クローンのヤング率は林分ごとの遺伝獲得量が大きいだけではなく、九州全体をほぼ網羅する範囲に配置された6林分を込みにした遺伝獲得量についても大きいことがわかり、しかも胸高直径との間に相関関係は認められないことから、クローン選抜による育種効果は極めて高いことがわかった。この結果は6林分を込みにした分散分析の結果から得られており、6林分を含めた地域で平均的に得られる育種効果を示す。しかし、分散分析の結果ではクローンと林分の交互作用が有意になっており、林分によっては思ったほどの育種効果がえられないおそれがある。この点において、Fig. 6-2に示したエバハートとラッセルの手法によるクローンごとの回帰直線から明らかのように、ヤング率には林分ごとのヤング率による順位づけが大きく変化するような交互作用は認められない。Fig. 6-3に示されるように林分間の距離にかかわらず林分の相互間の相関係数値は常に高い。これらの

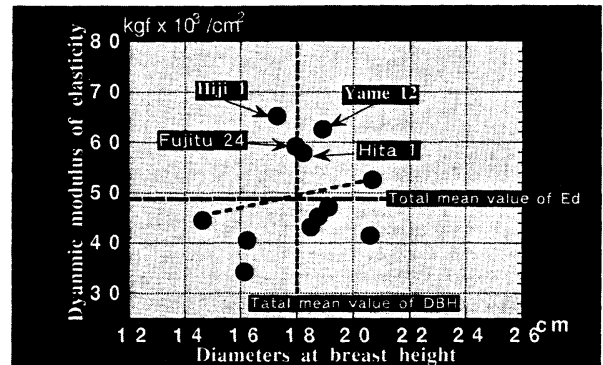


Fig. 6-4 Relationship between the dynamic modulus of elasticity and the diameter at breast height based on total mean value of six stands.

結果によって、クローンのヤング率について、地域を区分して育種事業を進める必要はないことが明らかである。

ただし、胸高直径については林分による変化が極端なクローンも一部存在しており、このことから、ヤング率と胸高直径とを同時に改良する場合には胸高直径に関する林分とクローンとの交互作用によって、地域区分が左右されることもありうることがわかった。

6. 2. 3 クローン林業の「品質管理型木材生産」への適用法の検討

利用上求められる木材の品質を念頭において造林をおこなう「品質管理型木材生産」を指向した研究例として、ニュージーランドのラジアータパインに関するものがある。Cown らは成熟材の容積密度が平均年気温と相関が高いことをみだし ($r=0.7$)、ニュージーランド全土を高容積密度材生産地帯、中容積密度生産地帯、低容積密度生産地帯に区分した (Cown D. J.: 1974A, Cown D. J. and McConchie D. L.: 1983)。これは大まかな区分であるが、経営規模の大きいニュージーランドでは、経営戦略を立てるうえで十分な精度の情報である。また、遺伝的な変動については考慮されていないが、これは初期の育種的研究では容積密度の改良効果は5%程度と見積もられ、期待した効果が得られないとされたことによる (Kirimonth and Whitehouse L. J.: 1991)。この方法をわが国のスギに適用する場合、スギについては本研究においてすでに明らかにしたように、ヤング率、心材含水率で遺伝的な変異が大きいこと、20%近く of 育種の改良効果を期待できる結果が得られており、遺伝的な変動を無視して気温等の因子と木材性質との関係を論ずることに無理がある。さらに、わが国の地形や気象変化の複雑さが障害となって一定の相関関係を得るために多くのデータが必要であると予想されること、わが国では経営単位が小さいため、マクロな因子との相関関係では林分単位 of 環境要因に起因する誤差によって個々の経営者が品質を予測するのに十分な精度が得られないことも予想される。したがって、こうした試みについて、スギの場合はまず遺伝変動の利用法を検討することからはじめるべきであろう。また、高田らはカラマツのヤング率について、立木状態で測定する手法によって林分全体のヤング率 of 下限値を推定し、これを木材の品質管理にむすびつけるとともに、ヤング率の高い個体を選抜することによって構造材生産を目標とする林木育種を並行して実施することを提唱した (高田他:1992, 高田:1994)。これは収穫に先立って木材の品質を推定できる点において現状よりも有利であるが、林木が成熟材部を形成する林齢になるまでデータが得られないことから、造林のまえに種苗を選択することができない点において「品質管理型木材生産」として不十分である。一方、造林に先立って収穫時の木材の品質を統計的に裏付けされた精度によって推定できるのであれば、林業者は利用を念頭においた経営戦略の立案をより有利にすすめることができる。すでに述べたように親と子供が似かよる確率を示すのが遺伝率であった。また、クローンのヤング率は広い地域を含めた場合でも遺伝率が高いという結果を得ている。

これらのことから、親クローン of 特性から子供クローン、すなわち、クローン種苗によって造林した林分から生産される木材 of ヤング率を推定する方法について考察した。考察には6林分を込みにしたクローンごとのヤング率 of 平均値と広義の遺伝率を用いた。

クローンを選抜したときのヤング率と選抜個体 of 種苗を造林・収穫して得られる木材 of ヤング率との関係は、親と子供の形質相関の問題としてとらえることができる。親と子供の相関係数は「実現した遺伝率」として相加的遺伝分散から推定した狭義の遺伝率と一致する (Steinhoff R. J. et. al.: 1971, 高田:1979, 大庭:1991)。ところが、クローンは相加的、非相加的すべての遺伝分散を後代に伝えるので (高田:1979, 大庭:1991)、「実現した遺伝率」は広義の遺伝率に一致するとみなせ

る。したがって、親クローンと子供クローンの間の相関係数は広義の遺伝率 0.7 と一致する。また、親クローンと子供クローンとは遺伝子型が全く同じなので、それぞれの分散は一致することを仮定できる。これによって、親クローンと子供クローンの相関関係を示す回帰直線の傾きは相関係数と一致するとみなすことができるので、広義の遺伝率から得た相関係数 0.7 が回帰係数となる。また、回帰直線と Y 軸との切片は $(1 - \text{相関係数}) \times \text{親クローンの平均値}$ から求められ、 $0.3 \times 50 \text{ kgf} \times 10^3 / \text{cm}^2 = 14.8 \text{ kgf} \times 10^3 / \text{cm}^2$ と計算される。これら式の誘導によって、ヤング率に関する親クローン (X) と子供クローン (y) の回帰式 1 が得られる。

$$y = 14.8 + 0.7 X \quad (\text{回帰式 1})$$

構造材としての利用を仮定し、ヤング率を指標にするならば、「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」の機械的等級区分から利用上の品質を評価できる。供試材 5 (地域差検定林) の 6 林分を込みにしたヤング率のクローンごとの平均値において、E70 をクリアするのは $65 \text{ kgf} \times 10^3 / \text{cm}^2$ を示した日出 1 である。この日出 1 のヤング率 $65 \text{ kgf} \times 10^3 / \text{cm}^2$ を回帰式 1 に代入した結果得られる $61 \text{ kgf} \times 10^3 / \text{cm}^2$ が日出 1 のクローン種苗を造林した結果に得られる木材のヤング率の推定値であり、推定ヤング率の 5% の危険率を示す上限値と下限値は $\pm 13 \times 10^3 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ と計算される。供試材 5 (地域差検定林) の 6 林分込みのクローン別平均値と回帰式 1 から推定した親クローンのヤング率と収穫された木材の関係を 5% 危険率の上限値、下限値とともに Fig. 6-5 に示す。回帰式 1 は供試材 5 (地域差検定林) の 6 林分込みにした遺伝率にもとづいているので、結果は九州地方全体に適用できることが期待でき、この図に親クローンのヤング率を当てはめることによって、収穫時の木材のヤング率を推定することができる。他の性質についても、ヤング率のように遺伝的母数が得られたのであれば、同様な方法によって収穫時の性質を予測することが可能になる。これらによって、林業経営者は造林に際して最終的に生産される木材の性質に基づいて最適種苗の選択が可能であり、木材工業では植栽されている種苗から木材の特性を判断したうえで原材料の調達ができることを明らかにした。

この節においてこれまでに示した「品質管理型木材生産」の概念を、工業における「品質管理」の概念にあてはめると次のようになる。工業における「品質管理」は Fig. 6-6 に示した概念図のように予め設定された目標値と実際の製品の測定値を比較・検討し、双方のずれに見合った量をコントローラによって制御して目標値に近づけることで実現する。これはそのまま、「品質管理型木材生産」に置き換えられる。Fig. 6-5 で、括弧書きした部分はそれぞれの工程に相当すると考えた林業の各過程である。これらは各工程について、設定目標、工程は造林、保育など、コントローラは育種、施業など、コンピュータによる計算は調査、管理など、実測値は実際の利用現場における品質評価あるいはストレスグレーディングに相当するものであると考えられる。

この作業の流れのなかで、林業が工業と異なるのは入力から出力までに長い年月を必要とすることであり、このことは制御に必要な情報のフィードバックについても長い年月を必要とすることを意味する。そこ

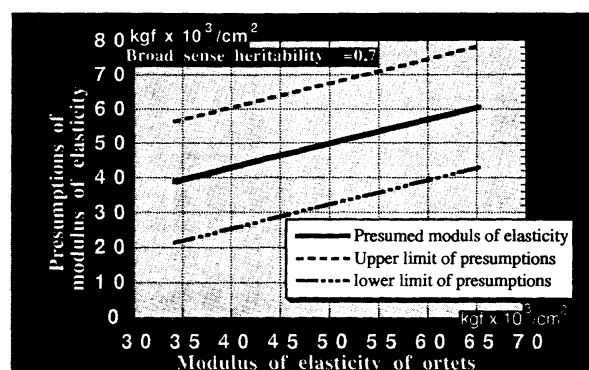


Fig. 6-5 Presumption of modulus elasticity of progeny.

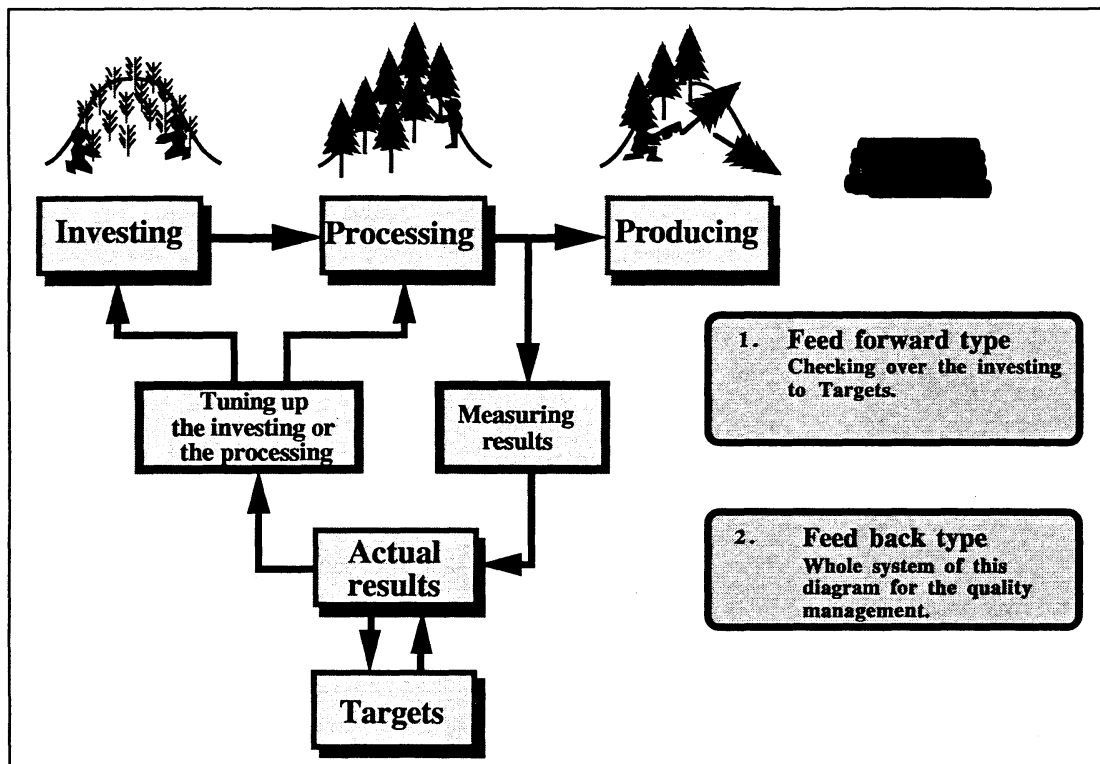


Fig. 6-6 Concepts of the quality management for industry, and actual forestry operations according to the former concept.

で、意味をもってくるのがクローンの特性にもとづいた収穫時の木材性質の推定である。これは林木の長い生育期間内に起こる各種の環境要因などの影響を含め、収穫時の木材の性質を育種技術によって予測することである。これによって、制御に至る時間の流れを短縮することが可能になる。また、収穫した木材のヤング率の測定は工業製品のロット試験に相当するが、工業製品と異なって規定に達しないロットであっても廃棄されることはない。バラツキのパラメータは親クローンの変動係数そのものと考えられるので、ロットの平均値に応じた利用場面で使用すればよく、得られたデータは遺伝的母数の精度をより高めることに役立つ。

このように「品質管理型木材生産」においては、育種は品質制御に必要な情報を提供し、また、品質に直接かわる種苗の選択をおこなうものである。遺伝的母数によって収穫時の木材性質を予め推定することによって、造林者は最適の種苗を選択することができ、木材工業では植栽されている種苗から木材の特性を判断したうえで原材料の調達ができる。

6. 3 結論

本章における考察の結果によって、次に示す事項がわかった。

- (1) 九州のほぼ全域を網羅する6箇所の林分を込みにした定義に基づいて求めた広義の遺伝率は0.7である。この値は、林分単位で求めた広義の遺伝率と同等か、それ以上の大きさである。
- (2) 6箇所の林分を込みにした遺伝獲得量は、利用面の品質基準である「機械的等級区分製材」に対して、等級の一段引き上げに相当するものであると評価できた。

- (3) クローンのヤング率に関する評価については、九州全体を一つの経営単位として適用が可能になる見通しをつけた。
- (4) クローンのヤング率と胸高直径の間には有意な相関関係は認められなかった。よって、両者は独立した性質であることを示す結果が得られた。このことは、胸高直径とヤング率について、育種技術によって肥大生長量とヤング率を同時に改良できる可能性を示唆する。ただし、胸高直径には強い交互作用が認められたことも事実であり、両者を同時に改良する場合は、クローンの評価の適用範囲が胸高直径の適用範囲によって制限されることについて、留意すべきである。
- (5) クローンは①広義の遺伝率は親クローンと子供クローンの相関係数と一致すること、②親クローンと子供クローンそれぞれの分散は等しいとみなせることを利用し、親クローンのヤング率から素材のヤング率を予測することができる。

このように、クローンの木材性質についての育種学的成果はクローン林業に基づく「品質管理型木材生産」として適用できる可能性を示した。しかし、ここで得られた結論は平均的な植栽密度（3000 本/ha）で設定され、通常に施業された林分から得られたデータに基づいている。施業もまた木材性質に影響を与える重要な因子ととらえられている。そこで、これまでに得られたクローンの木材性質に関する遺伝的な知見と施業との関係について、検討する必要を認める。そこで、施業のうち最も影響がでやすいものの一つとして、植栽本数が林木の成長と木材性質にあたえる影響を、遺伝と環境の視点から検討する。

7 クローンによる「品質管理型木材生産」における植栽本数の影響についての考察

これまでの章において、実生による林業によって生産される木材性質にくらべてクローンの木材性質はバラツキが小さいことが明らかになった。しかも、高い育種効果が期待されることを明らかにした。とくに育種技術導入の効果はヤング率において顕著なことがわかった。したがって、クローンの木材性質に関する育種学的成果を用いる林業を推進することにより、構造用製材としての利用を目的とした「品質管理型木材生産」に応用できる可能性が示唆された。ただし、本研究の供試材が今日の国有林における一般的な植栽密度と施業体系によって管理された林分から採取されているので、異なった施業体系に本研究の成果がどの程度適用できるかについては問題として残っている。施業は木材性質に影響する重要な因子と考えられている。施業と木材性質との関係について、施肥や灌水の影響からとらえた例が報告されており（J. W. P. Nicholls: 1971A, 1971B）、単位面積当たりの植栽本数（植栽密度）も重要な因子と考えられて（J. P. Van Buitenen: 1969, 日本: 1969, 加藤: 1973）スギのクローンやヨーロッパアカマツの枝形質（明石ら: 1987, A. Fries: 1981）、ラジアータマツ、カリビアマツの木材密度への影響（Cown D. J.: 1973, 1971B, 1981A, 1981B）が報告されている。しかし、施業と育種効果の関係について言及した例は少ない。

そこで、本章では木材性質に関するクローンの育種効果と施業との関係について、最も基本的な取り扱いである植栽本数のちがいが木材性質に与える影響を調査し、その結果によって「品質管理型木材生産」で施業の効果と意義とを検討する。今回の研究では、3段階の植栽本数から構成された試験地の供試材4（密度試験地）について、軟エックス線・デンストメトリで測定した結果に基づき、植栽本数のちがいによる年輪構造の変化に関する情報を得る。本手法は早材から晩材に至る密度の変化を連続的にとらえる（Polge: 1978, 太田: 1978, 林他: 1981）。この手法に

よって得られる木材性質は、(1)年輪幅、(2)早材幅、(3)晩材幅、(4)年輪ごとの平均密度、(5)早材密度、(6)晩材密度、(7)晩材率のほか、(8)早材から晩材への移行パターンなど、木材性質、年輪内の特徴を含めて多くの情報を同時に得ることができる (Polge:1969, 1978, 太田:1978, 林他:1980, 野瀬:1989)。したがって、年輪構造の変化について、成長と密度の両面から同時にとらえることができる。

7. 1 結果

7. 1. 1 植栽本数のちがいによる年輪構造の変化

軟エックス線デンシトメトリから得られる指標値の相互間において、早材幅は年輪幅と、早材密度は各年輪ごとの平均密度と、最小密度は早材密度と、最大密度は晩材密度と、それぞれほぼ一致した挙動を示し、スギの年輪構造について今回の結果と同じ傾向が報告されている (藤澤:1993)。軟エックス線デンシトメトリから得られる指標は肥大成長に関するものと木材の性質とくに密度に関する情報を提供するものであり、スギでは、年輪幅と早材幅、早材密度と最小密度、晩材密度と最大密度、晩材率と平均密度の相互間において、高い相関関係が認められている (藤澤他:1989)。これら指標相互間の相関関係によって、年輪幅と早材幅および早材密度の変化と年輪ごとの平均密度は同様の経年変化を示すものと考えられる。晩材幅、晩材密度は、年輪幅、年輪ごとの平均密度とは独立した性質であることを示す結果が得られている (藤澤:1993)。このようなことから、本研究の解析では、年輪幅 (RW)、平均密度 (RD)、晩材幅 (LW)、晩材密度 (LD) の4つを指標としてとりあげ、植栽本数の年輪構造に及ぼす影響について検討した。

供試材4を採取した試験地は植栽本数を変えた3つのプロットによって設定されており、それぞれのプロットに22の精英樹クローンを植栽したものである。それぞれのプロット内の植栽間隔は、標準植栽区が1.8m×1.8m間隔 (3000本/ha)、密植区が1.4m×1.4m間隔 (5000本/ha)、高密植区が1.0m×1.0m間隔 (10,000本/ha) であった。

植栽本数の効果 (密度効果) は林冠が閉鎖状態にあるか否かによって異なるので (只木:1969)、林分の閉鎖時期を把握しておかなければならない。Fig. 7-1に、本供試材料採取時の胸高直径と樹冠径との回帰式から樹冠径を推定し、この推定樹冠径の随からの年輪数による変化を示す。Fig. 7-1で樹冠径が植栽間隔を越えた時点を林分閉鎖とすると、高密植区 (10000本/ha) では6年輪目、密植区 (5000本/ha) では9年輪目に閉鎖し、標準植栽区 (3000本/ha) は伐倒時点でも閉鎖していなかったと判定できる。

3. 2. 4で示したように、採取時の林齢は12年生であり、一方、試験体の多くは年輪数が12年輪であったので、年輪番号と植栽経過年とはほぼ一致するものとみなせる。

ここでとりあげたそれぞれの材質指標値ごとの平均値の経年変化をFig. 7-2に示す。年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) の経年変化は植栽本数区ごとの変化に特徴があった。

年輪幅 (RW) は標準植栽区、密植区、高密植区、いずれの植栽本数区においても、5年輪目より外側の年輪では常に標準植栽区で最も大きく、高密植区では最も小さく、密植区

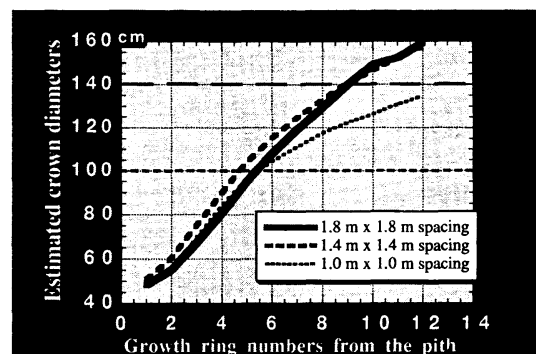


Fig. 7-1 Variation in estimated crown diameters in proportion to aging.

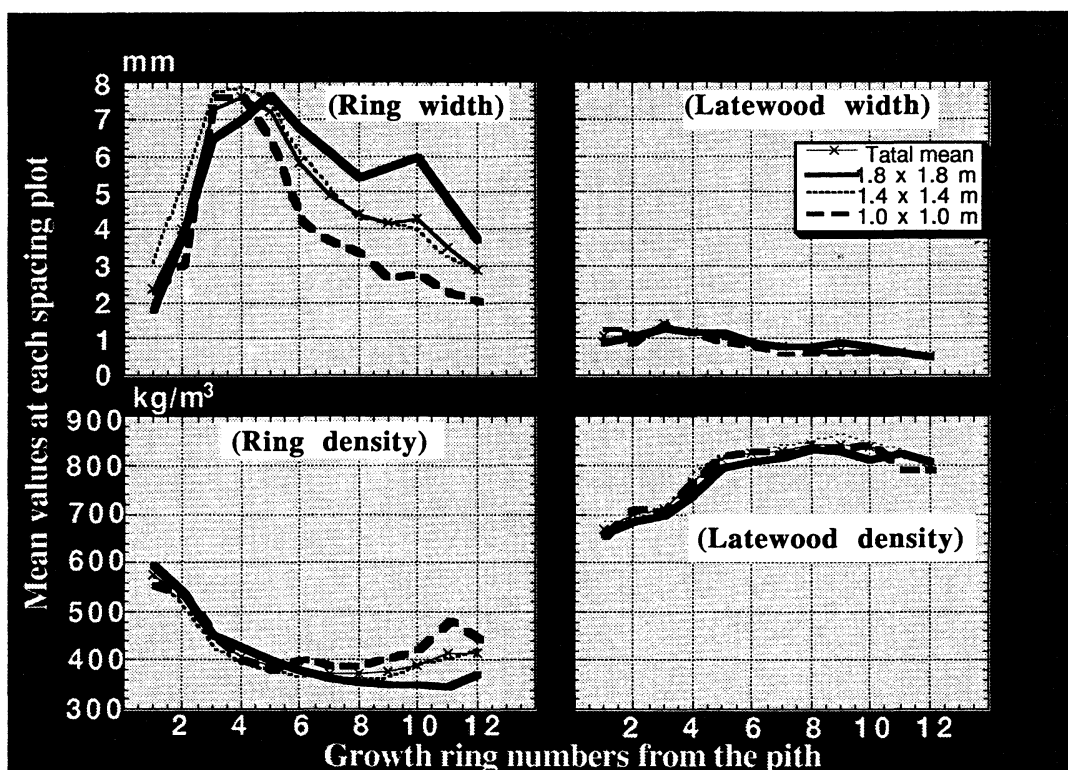


Fig. 7-2 Variation in mean values at each spacing plot in proportion to aging.

では両植栽密度区の中間の値となり、年輪幅 (RW) は植栽本数が多いほど小さくなる傾向が認められた。また、年輪幅 (RW) には髄から数年輪の間で急激に増大した後減少し、その後安定する傾向があり、年輪幅 (RW) のピーク値を示す髄からの年輪数 (以後年輪数とする) も植栽本数によって異なっていた。標準植栽区では髄から5年輪目にピークがあったが、密植区では髄から3年輪目にピークがあり、高密植区では髄から2年輪目にピークがあった。すなわち、年輪幅のピークを示す年輪数は植栽本数が多いほど早くなる傾向があった。

一方、平均密度 (RD) は9年輪目より外側の年輪では常に高密植区が最も高く、逆に標準植栽区が最も低く、密植区は両者の中間にあり、植栽本数が多いほど平均密度 (RD) が高くなる傾向にあった。また、平均密度 (RD) には髄から9年輪目まで急激に減少した後に安定する傾向があり、高密植区と密植区ではそれぞれ4、6年輪目で安定域に達したが、標準植栽区は9年輪目で安定域に達し、植栽本数が多いほど安定域に達する年輪数が早まる傾向にあった。

しかし、LW, LD については植栽本数のちがいによる明らかな差が認められない。特に密植区と高密植区との間では同じような経年変化の傾向であることがわかった。このことは RW や RD では植栽本数の影響がはっきりと表れたのとは異なっていた。

このように、植栽本数が多くなると年輪幅 (RW) は小さくなり、平均密度 (RD) は高くなったが、晩材幅 (LW)、晩材密度 (LD) では植栽本数のちがいによる変化は認められなかった。

7. 1. 2 植栽本数のちがいとクローンによる年輪構造の変異

植栽本数のちがいによるクローンの年輪構造の変化をくらべるため、年輪幅 (RW) が大きい、すなわち、肥

大生長量の大きなクローン No.13 と小さなクローン No.14 を選び、年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) の経年変化を Fig. 7-3 に示す。これら両極端の年輪幅 (RW) を持つ2つのクローンはともに、年輪幅 (RW) は標準植栽区が最も大きく、逆に高密植区で最も小さく、密植区は両植栽区の中間の年輪幅 (RW) を示した。クローンごとの年輪幅 (RW) を相互間で比べるとクローン No.13 はどの植栽本数区においてもクローン No.14 に比べて RW が大きい。また、RD に関しては、クローン No.13 とクローン No.14 とともに高密植区が最も高く、逆に標準植栽区が最も低く、密植区は両植栽区の中間の平均密度 (RD) を示した。クローンごとの RD を相互間で比べるとクローン No.14 はどの植栽本数区においてもクローン No.13 よりも高い。

晩材密度 (LD) は経年変化に関してクローンごとにははっきりした違いは認められず、晩材幅 (LW) の経年変化についても晩材密度 (LD) と同じ傾向であった。

このように、年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) について、クローン No.13 と No.14 との間の相互比較による大小関係はどの植栽本数区においても同じ結果を得たことにより、年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) に関しては、2 クローンは年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) とともに植栽本数のちがによる影響はないことがわかった。また、Fig. 7-3 から年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) とともに植栽

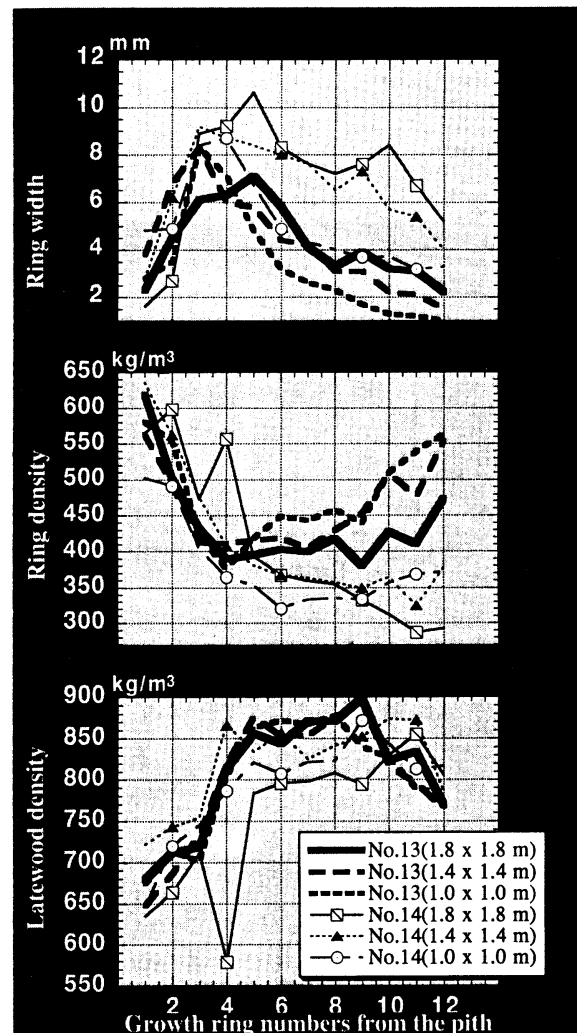


Fig. 7-3 Comparison of growth ring features between two clones with typical radial growth.

本数の差の影響よりもクローンのちがによって生じる変化の方が明らかに大きい。そこで、供試された16クローンを含めたクローン間の変異幅が植栽密度のちがによってどのように変化するのか、クローン間の変動係数から検討した。クローン間の変動係数(以降変動係数とする)の経年変化を Fig. 7-4 に示す。年輪幅 (RW) の変動係数について、いずれの植栽本数区においても3年輪まで減少した後に順次増大する傾向が認められた。植栽密度区別の比較では、密植区で髄から6年輪、高密植区で髄から8年輪から変動係数が急激に増大する傾向が認められた。その結果、髄から9年輪より外周の年輪では、変動係数が高密植区で最も大きく、標準植栽区で最も小さく、密植区は両植栽区の中間の値を示す傾向が認められ、変動係数の植栽本数区相互間における違いが明確になった。Fig. 7-4 において、密植区と高密植区で変動係数が急激に増大した年輪は、すでに Fig. 7-1 に示した林分の閉鎖時期と一致する。また、髄から9年輪目以降の標準植栽区の変動係数は20%前後であり、これは標準的な1.8m × 1.8m 間隔で植栽された林分で従来から得られている傾向(鎌澤他:1993)と同じ値であったが、高密植区の変動係数は40%前後であり、これは標準植栽区の変動係数にくらべて約2倍の大きさであった。このように、年

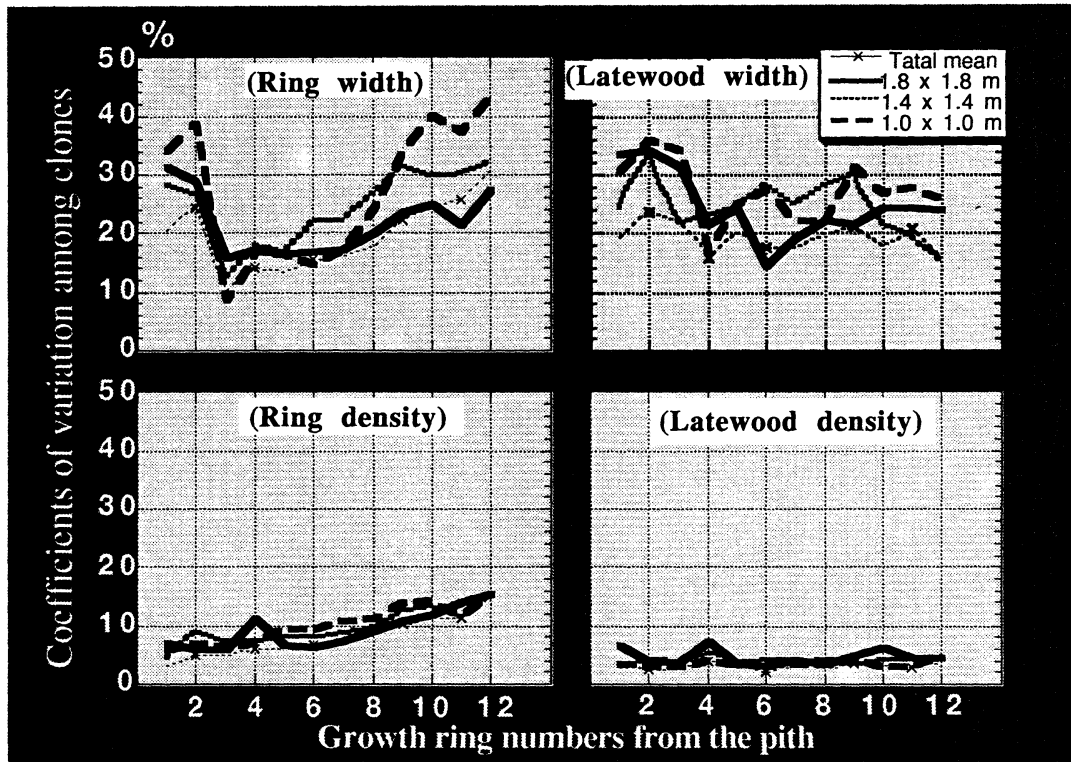


Fig. 7-4 Variation in coefficients of variation among clones at each spacing in proportion to ageing.

輪幅 (RW) では植栽本数が高いほどクローン間の変動係数も大きくなる傾向があり、変動係数が増大する時期はそれぞれの植栽本数区が林分閉鎖した時期に一致することがわかった。

一方、平均密度 (RD) の変動係数の経年変化において、年輪幅 (RW) で示された髄から3年輪間の減少傾向は認められず、一貫して横ばいもしくは緩やかに増大する傾向が認められた。植栽密度区相互間における変動係数の比較では、5年輪から10年輪の間で高密植区が最も大きく、逆に標準植栽区が最も小さく、密植区は両植栽本数区の間の中間の値を示す傾向が認められた。しかし、標準植栽区と高密植区間の変動係数の差は約2%と小さく、11年輪以降ではこの関係も認められなくなった。このように、平均密度 (RD) の変動係数には植栽本数のちがいによる明確な変化は認められず、いずれの植栽密度区においても変動係数の大きさはおおむね10%前後であった。この値は平均密度 (RD) の変動係数について標準的な1.8m × 1.8m 間隔で植栽された林分からこれまでに得られた傾向と同じである^(藤澤他:1993)。また、クローン間の変動係数について、平均密度 (RD) は年輪幅 (RW) よりも小さく、すべての植栽本数区の平均値によるクローン間の変動係数の比較において、平均密度 (RD) は年輪幅 (RW) とくらべてほぼ1/2の大きさであった。

ところで、晩材幅 (LW) のクローン間の変動係数は、各植栽本数区ともに髄から4年輪の間で減少した後は安定する傾向が認められ、同様に晩材密度 (LD) のクローン間の変動係数は髄から最外周の年輪まで5%前後でほぼ一定となる傾向にあった。すなわち、晩材幅 (LW) と晩材密度 (LD) のクローン間の変動係数について、植栽本数のちがいによる変化は認められなかった。また、本研究における晩材幅 (LW) と晩材密度 (LD) のクローン間の変動係数値はこれまでに報告された標準的な1.8m × 1.8m 間隔で植栽された林分で得られた傾向と

同じであった^(森澤他:1993)。

このように、クローン間の変動係数についても、晩材幅 (LW) と晩材密度 (LD) は植栽本数のちがいの影響が少ないことを示す結果が得られた。

Table 7-1 Degrees of freedom and expected variance components of mesn squares for each method of analysis of variances.

Analysis method	Sources of variances	df	Expected variance components
analysis of variances combined three levels of spacing	Replications	1	$\sigma\epsilon^3+2\sigma\epsilon^2+32\sigma\epsilon^1+96\sigma\rho$
	Spacing	2	$\sigma\epsilon^3+2\sigma\epsilon^2+32\sigma\epsilon^1+64\sigma\delta$
	The first level error	2	$\sigma\epsilon^3+2\sigma\epsilon^2+32\sigma\epsilon^1$
	Clones	15	$\sigma\epsilon^3+2\sigma\epsilon^2+12\sigma\chi$
	Clones x Replications	30	$\sigma\epsilon^3+2\sigma\epsilon^2+4\sigma\chi\delta$
	The second level error	45	$\sigma\epsilon^3+2\sigma\epsilon^2$
	The third level error	96	$\sigma\epsilon^3$
	Total	191	
Analysis of variances on each level of spacing	Replications	1	$\sigma\epsilon+2\sigma\epsilon\chi\rho+32\sigma\rho$
	Clones	15	$\sigma\epsilon+2\sigma\epsilon\chi\rho+4\sigma\chi$
	Clones x Replications	15	$\sigma\epsilon+2\sigma\epsilon\chi\rho$
	error	32	$\sigma\epsilon$
	Total	63	

Legend : $\sigma\epsilon^1$: The first level error, $\sigma\epsilon^2$: The second level error, $\sigma\epsilon^3$: The third level error,
 $\sigma\chi$: clones, $\sigma\delta$: Levels of spacing, $\sigma\rho$: Replications,
 $\sigma\epsilon$: error, $\sigma\chi\delta$: Interaction between clones and levels of spacing,
df : degree of freedom.

7. 1. 3 植栽本数のちがいがクローンの遺伝的母数に与える影響

分散分析結果の平均平方について、変動要因別の分散の期待成分と自由度を Table 7-1 に、また、分散の期待成分に基づいて算出した変動要因別の分散寄与率を Fig. 7-5 に示す。ここで、変動要因別の分散の期待成分は 1 次誤差分散、2 次誤差分散、3 次誤差分散、クローン間分散、植栽本数区間分散、クローンと植栽本数区間の交互作用分散、反復間分散であり、寄与率はこれら全ての分散成分の合計に対する各分散成分の比率である。

Fig. 7-5 にみられるように、年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) は植栽本数区間の寄与率の経年変化に特徴が認められた。すなわち、年輪幅 (RW) では植栽本数区間の寄与率は、髓から 4 年輪目以降急激に増大し、8, 12 年輪に落ち込みが見られるものの、6 年輪から 12 年輪の範囲では常に 30%~40% の高い値を示した。これに対して、平均密度 (RD) では植栽本数区相互間の寄与率は年輪数の増加にともなって緩やかに上昇、もしくは横ばい傾向にあり、11 年輪目を除くと 5% 前後で一定の値を示した。クローン間に関する分散寄与率について、年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) とともに髓から最外周の年輪に向かって緩やかに上昇する傾向が認められ、植栽本数区間に関する寄与率にみられた特定の年輪での急激な上昇、下降は認められなかった。また、クローン間に関する分散寄与率の最高値は、年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) とともに 12 年輪目で認められ、性質の相互間におけるクローンに関する寄与率の大きさの比較では、平均密度 (RD) が 26% で、年輪幅 (RW) の 17% にくらべて若干大きい結果が得られた。

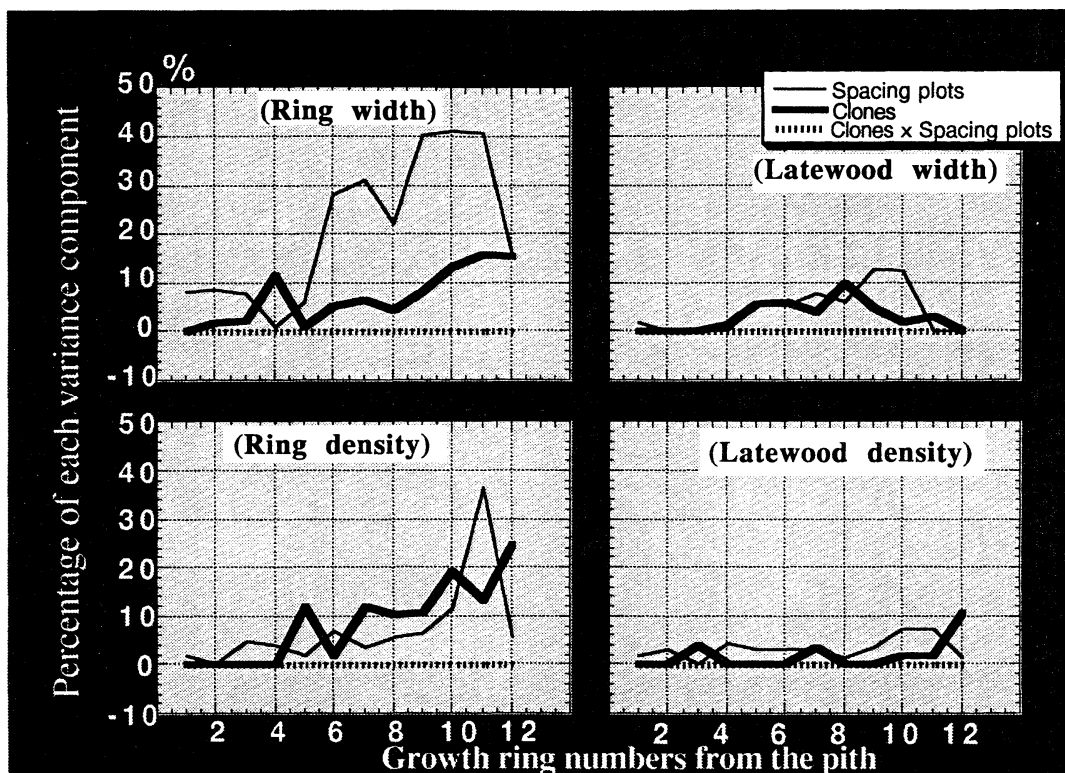


Fig. 7-5 Variation in variance components upon analysis of variance combined with three spacing plots in proportion to ageing.

クローンと植栽本数区間の交互作用の分散寄与率は年輪幅 (RW), 平均密度 (RD), 晩材幅 (LW), 晩材密度 (LD) いずれの性質においても髄から最外周にいたるすべての年輪において全く認められなかった。

このように、年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) の変動因別分散成分は、髄から最外周の年輪にむかって植栽本数区間とクローン間の分散が順次増大する傾向にある。年輪幅 (RW) では植栽本数区間の分散寄与率がクローン間の分散寄与率とくらべて大きく、一方、平均密度 (RD) ではクローン間の分散寄与率の方が植栽本数区間の寄与率とくらべて大きい結果が得られた。

次に、植栽本数区別に分散分析を行い、式 7-1 に基づいて年輪ごとに広義の遺伝率を求め、植栽本数区ごとに広義の遺伝率の経年変化を Fig. 7-6 に示す。

式 7-1

$$h^2 = \sigma_c / (\sigma_d + \sigma_{ec} + \sigma_c)$$

ここで、 h^2 : 広義の遺伝率, σ_c : クローンによる分散, σ_d : 植栽本数の差による分散, σ_{ec} : クローンと植栽本数との交互作用による分散である。

年輪幅 (RW) はどの植栽本数区においても、年輪数の増加とともに広義の遺伝率は増大したが、植栽本数区相互間では顕著な差は認められなかった。平均密度 (RD) についても、年輪幅 (RW) と同じく年輪数の増加とともに広義の遺伝率は増大する傾向が認められる。標準植栽区における広義の遺伝率は、髄から 9 年輪までのあいだ、密植区と高密植区の広義の遺伝率よりも低い値を示す。こうした植栽本数区相互間における広義の遺

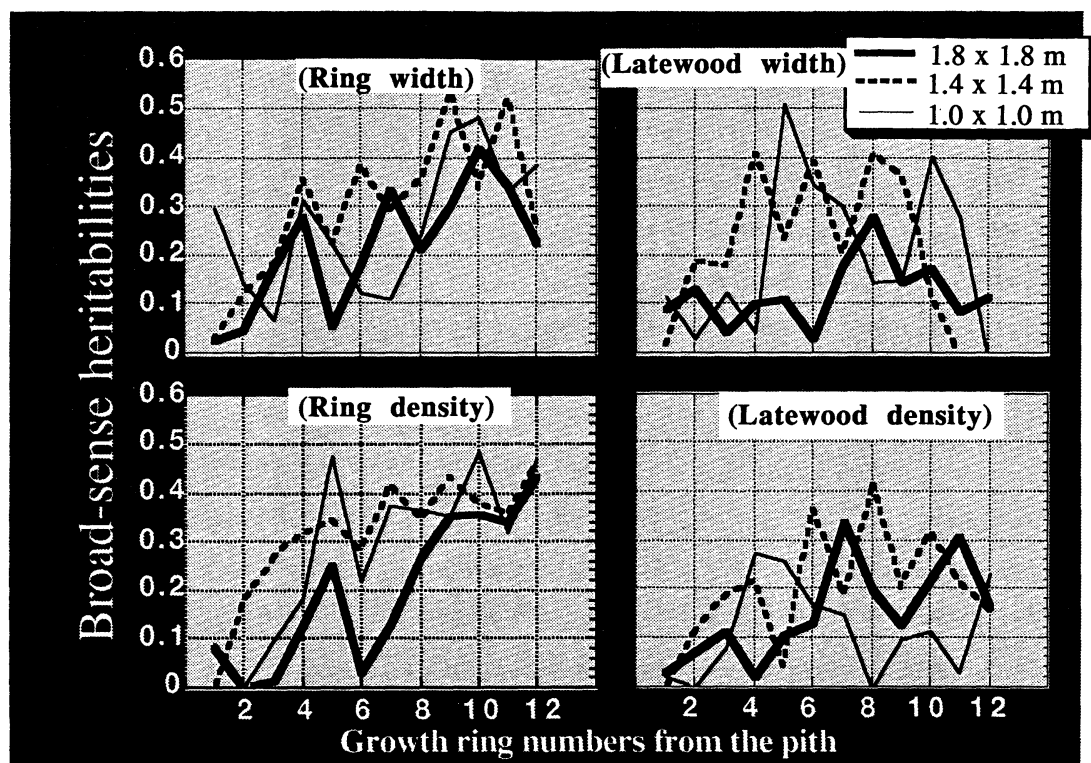


Fig. 7-6 Variation in broad-sense heritabilities at each spacing in proportion to ageing.

伝率の差についても、9年輪より外側の年輪では認められなくなる。この結果によると、植栽本数が高くなることによって広義の遺伝率が高まるように考えられるが、9年輪以降では広義の遺伝率の植栽本数区間の差は認められなくなるので、高い広義の遺伝率を示す時期が高い植栽本数によって早まったとかがえる方が穏当であろう。

これに対して晩材幅 (LW)、晩材密度 (LD) の傾向は年輪幅 (RW)、平均密度 (RD) と大きく異なり、クローン間における晩材幅 (LW)、晩材密度 (LD) の分散寄与率はおおむね5%以下の低い値で変化する傾向にあった。植栽本数区ごとの広義の遺伝率の経年変化について、晩材幅 (LW)、晩材密度 (LD) とともに一定の変化傾向は認められず、年輪ごとに不規則な変動を示した。

7. 2 考察

植栽本数のちがいが年輪構造に与える影響について検討した。その影響は性質によってちがいがああるものの、年輪幅 (RW) と平均密度 (RD) の比較では植栽本数のちがいによって明らかな差が認められた。密植になるほど年輪幅は小さくなり、逆に年輪ごとの平均密度は高くなる傾向にあることがわかった。しかし、晩材部に関しては晩材幅 (LW)、晩材密度 (LD) とともに植栽密度のちがいによる変化は認められなかった。

これらの結果から、植栽本数のちがいによる平均密度の変化について、次のように考えることができる。植栽本数が多いほど肥大成長は抑制され、年輪幅が縮小するが、晩材幅は変化が小さいので、年輪幅に対して晩材幅が支配的となり、晩材率が上昇する。多くの針葉樹で晩材率と容積密度の相互間に高い相関が認められてお

り(野瀬他:1988, 藤澤他:1989, 小田他:1990, 高田他:1992), 晩材率の上昇にともなって平均密度が上昇する。このことは、密植になるにしたがって、晩材率が高くなることから検証できる。植栽本数区ごとの晩材率の経年変化を Fig. 7-7 に示す。図から明らかなように6年輪以降では明らかに密植になるほど晩材率が上昇しており、この傾向はすでに Fig. 7-2 に示した年輪ごとの平均密度と同じ傾向であった。すなわち、高い植栽本数によって肥大成長が抑制された場合、相対的に晩材率が高くなり、年輪ごとの平均密度も高くなることがわかった。

このように、植栽密度を変えることによって、肥大成長だけではなく平均密度などの木材性質についても操作することが可能であることを示す結果が得られた。供試材4(植栽密度試験地)による実験結果から、12年輪目における木材性質は、植栽本数を3000本/haから10000本/haにあげることで、平均晩材率が15%から30%まで上昇し、平均密度は 360kg/m^3 から 450kg/m^3 まで上昇することが明らかになった。また、高い植栽本数によって肥大生長量が抑制されることは、木口断面に含まれる晩材数が増加することになり、「年輪構成効果」(小泉, 1986)によって曲げヤング率も変化することが予想される。さらに、ラジアータパインについて、間伐によって肥大生長量を増加させた場合、仮道管長が短くなったことを報告しており(Cown D. J.:1973), 植栽本数を変えることによって仮道管長などの木材構成要素が変化することも考えられる。このことは、木材性質と植栽本数との比例関係を明らかにすることによって、木材性質を施業技術によってある程度操作できる可能性を示唆するものである。また、施業技術を木材性質の制御に適用するためには、本研究で得られた結果のように、施業と木材性質との相互関係を定量的な分析によって明らかにしていかなければならない。

一方、クローンと植栽本数区間の間の交互作用はいずれの性質と年輪においてまったく認められなかった。このことは、木材性質について、一般的な植栽本数で保育された林分におけるクローンの評価について、植栽密度を変えてもクローンの相互間の比較関係は変化しないことを意味し、植栽密度と年輪構造との関係の検討結果から得られた最も重要な知見である。年輪幅が両極端にある2クローン間で指標を比較した Fig. 7-3 に示されるように、植栽密度が高いほど年輪幅は減少し、平均密度は上昇するが、2クローンの相互間におけるこれらの性質の大小関係はまったく変化しなかった。また、クローン間の変動係数に関する検討結果から、植栽密度を高めることで、クローン間の差異が明確になることが明らかにされている。さらに、広義の遺伝率について、植栽密本数のちがいによる値の変化は認められず、遺伝的母数についても植栽密度のちがいによる影響は少なかった。

これらの結果によって、年輪構造に関する育種効果は植栽密度によってクローンごとの評価が変わることはなく、場合によってはかえって高まることもあるということは明らかである。クローンの育種効果に基づいて造林する「品質管理型木材生産」に施業技術をくわえることを前提として、年輪構造の変化に対して育種と植栽本数のどちらが効果的であったかを検討した。変動因別寄与率によると、少なくとも髄から12年輪の間では年輪幅は植栽本数の影響が大きく、年輪ごとの平均密度ではクローンの影響が強いことを示している。しかし、いずれの場合においてもクローンの相互間の大小関係が植栽本数によって変化することはなく、クローン間の変動係数に示されるようにむしろ植栽本数が高いほどクローン間のちがいが明確になる。また、Fig. 7-3 では年輪幅、年輪

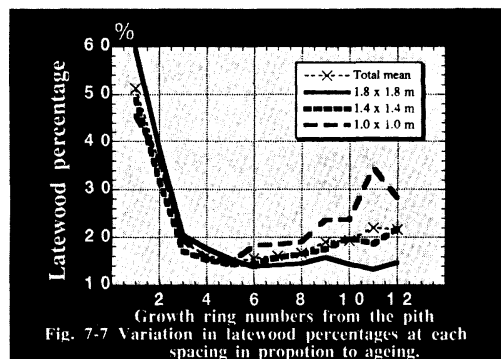


Fig. 7-7 Variation in latewood percentages at each spacing in proportion to ageing.

ごとの平均密度ともにクローンのちがいによる変異幅の方が植栽本数のちがいによる変異幅よりも大きい。スギクローンについて、植栽本数のちがいによる樹高、胸高直径、樹幹形、枝角、生枝高の変化を調べた例では、植栽本数とクローンとの間にまったく交互作用は認められなかったとしながら、植栽本数は、樹幹形、生枝高でクローンよりも強く影響し、他の形質では植栽本数よりもクローンの方が強く影響したとしており、植栽密度のちがいの影響は形質によって異なったことを認めている^(明石他:1987)。木材性質と植栽本数との関係について、本研究成果によって、年輪幅と平均密度に関しては植栽本数のちがいよりもクローンの影響が強いことが明らかになったが、性質によっては植栽本数の影響の方が強い可能性を否定できるものでない。しかし、いずれの場合においても、本研究同様に植栽本数とクローンとのちがいによってクローンに関する育種効果は変化するものではなく、適切な施業によって育種効果はさらに高まる可能性のあることがわかった。また、「品質管理型木材生産」に施業技術を取り入れるためには、施業法と木材性質との相互関係について、定量的に分析しなければならない。

7. 3 結論

供試材4（密度試験地）によるクローンの木材性質に関する育種効果と施業との相互関係についての本章における考察によって、次に示す事項がわかった。

育種と施業は相反するものでなく、両者を組み合わせることによってより高い木材性質に関する育種効果が得られる。このことから、クローン林業による「品質管理型木材生産」において、育種と施業を効果的に組み合わせることで、より効果的に木材性質を制御できることが期待される。

また、育種と施業の効果的な組み合わせを得るためには、木材性質と施業との関係の定量的な解析が必要になるであろう。

8 総合考察

スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) は、わが国の重要な造林樹種の一つである。そのために、第2次世界大戦後の国土復興を目的とした拡大造林事業以来、すでに500万haに及ぶスギ造林地をかかえている。その結果、スギ造林地は、わが国の人工造林地面積の50%、人工造林地の総蓄積の60%を占めるに至った^(吉川:1983)。

ところで、スギは木材性質のバラツキが大きいとされている^(加納:1960, 1961, 1983)。ところが、品種間あるいはクローンの間で木材性質のバラツキが大きいものの、品種内およびクローン内ではバラツキが小さいとされている。この原因として遺伝の関与が提示されている^(宮島:1982, 1983, 矢幡他:1980, 見尾:1983, 藤澤他:1992B, 1993, 1994, 1995A)。育種によって形質を改良する場合、その改良の効果すなわち育種効果は、遺伝率と選抜差の積である遺伝獲得量によって評価できる。バラツキすなわち形質の変異幅が大きいと、選抜差を大きくとることができる。これらから、スギの木材性質が高い遺伝率を示すのであれば、高い育種効果が得られることを期待できる。いうなれば、スギの木材性質のバラツキの大きさが、林木育種では高い育種効果に結びつく可能性がある。この観点から、スギの木材性質に関して、クローン間および実生家系間の変異幅や遺伝的母数などの評価が進められつつある^(小田他:1982, 矢幡他:1987, 小田他:1982, 1988, 堀他:1989, 古賀他:1990, 林野庁:1992)。しかし、これらの動きは緒についたばかりであり、遺伝的研究成果の具体的な利用を念頭においた、横断的かつ総合的な検討は未だになされていない。

一方、次世代の木材利用では、工業用原材料としての要求がより強まって行くと予想されている。伝統的な木材利用とは異なり、工業用原材料としての利用では、材質の良否を判定する、より合理的な指標が求められるであろう^(堤・1986, 1989)。しかも、こうした需要環境の変化に適合した動きがすでにおこっており、ニュージーランドのラジアータパイン^(Greed J. A. : 1993)や北米の針葉樹^(Rydellius J. A and Libby W. J. : 1993)では、利用に対して合目的な木材の生産をめざした林業が現実に向かっている。

わが国は、現在、木材需要の78%を輸入木材に占められている。このため、わが国の林業は極めて厳しい状況にある。ここまで至った原因の一つに、わが国林業が、かならずしも林産業の動向を注視してこなかった現実を掲げることができる。ところが、世界的には、次世代の木材利用に適合できる木材の生産が、すでに始まっている。これらから、林業を再生するために、林業と林産業が連携しあい、利用に適した木材の生産をはかることを提言する。そのためには、林木生産の科学と木材利用の科学とが、緊密な連携を創出する必要がある。具体的には、林業は林産業の動向に敏感に反応し、木材利用の合理性を追求できる木材を生産しなければならない。利用では林業での成果を見込んだ製品の改良・開発あるいは最終生産品の品質管理を行う。また、利用に合理的な木材のありかたを林業に明示するとともに、改良木材の利用によって生じた利益の相応分は原料コストアップの形で林業に還元する。この林産から林業への利益の還元は、更なる林業の構造改善の意欲につながり、より利用に合理的な木材の生産につながる。このような、林業と林産業が共通の価値観にしたがって木材を生産する一環したシステムを考える。これは、工場における製品生産に原型をおいた、「品質管理型木材生産」ともいうべき林業の形態である。

本研究の目的は、次にしめすとおりである。国産材の現況を改善するためには林業と林産業の連携が今までにもまして必要であると考ええる。林木育種は林木の形質や機能にかかわるため、林業と林産業の双方に働きかけることができる。そこで、変異幅や遺伝的母数などの育種的な情報の蓄積の結果から、林業と林産業の連携の中で育種がはたすべき役割・効果について考察する。そのため、蓄積、生産量、いずれにおいても国産材の代表であるスギを例にとり、木材性質のバラツキに関して、変異幅、遺伝的母数、遺伝獲得量、変動因別分散成分などを評価する。その結果に基づき、育種技術による形質の改良などに対する効果を考察する。

考察の対象とする木材性質は、スギ材利用のときの品質と関係が深く、客観的な表現が実現できることを目指して、検討を加えた。その結果、利用にむすびつく重要な木材性質として①ヤング率、②容積密度、③心材含水率、④胸高直径をあげる。

8. 1 木材性質に関する実生とクローンの育種効果の比較

育種効果は、遺伝率と選抜差の積である遺伝獲得量から評価できる。実生について、自然受粉家系の供試材2から推定した家系遺伝率は、胸高直径では0であった。しかし、木材の物理的性質の家系遺伝率は、辺材容積密度が0.14、心材容積密度が0.44、ヤング率が0.29、心材含水率が0.47であった。胸高直径の遺伝率が0であったのは、家系と反復間の交互作用が大きいために家系間分散が認められなかったためである。胸高直径には反復間に有意差が認められた。このことから、反復間で成長に影響するような環境の違いがあったものと考えられる。反復間の交互作用が大きくなったのは、こうした反復ごとの環境の違いに敏感に反応する家系が存在したためと考えられる。これらのことから、ヤング率、容積密度、心材含水率のバラツキに関しては、胸高直径のバラツキ

にくらべて家系の違いによる影響が強く、環境の違いによる影響が弱いといえる。

ところで、一般に実生林分は、採種園産の種子によって造林されている。この場合の育種効果は、遺伝分散の中の相加的遺伝分散、すなわち、一般組み合わせ能力から求めた狭義の遺伝率を使って評価するべきであるとされる。しかし、木材性質について、一般組み合わせ能力から狭義の遺伝率を求めた例は、これまで皆無であった。そこで、本研究では、狭義の遺伝率を計算するために設定された人工交配家系林分の供試材3を使って、一般組み合わせ能力を求める必要を認めた。ここに初めて木材性質に関する狭義の遺伝率を得た。供試材3から明らかになった狭義の遺伝率は、ヤング率が0.14、心材含水率が0.17と低い値であり、辺材容積密度と心材容積密度では遺伝率がほとんど認められなかった。しかし、胸高直径は0.38と高い狭義の遺伝率が得られた。ヤング率、心材容積密度、辺材容積密度について、一般組み合わせ能力と特定組み合わせ能力の合計である人工交配家系間の分散は大きい。しかし、特定組み合わせ能力が大きいために、一般組み合わせ能力が小さくなる。そのため、狭義の遺伝率が小さく推定された。この結果は、自然受粉家系から推定した家系遺伝率と矛盾するようにみえる。これについて、次のように考えることができる。スギの受粉は、近隣木からの花粉による場合が60%を越すことが確かめられている^(岡池, 占越:1976)。このことから、採種親について、花粉親の大半が近隣木に特定されることになる。よって、花粉親の効果はランダムではなくなる。しかも、特定組み合わせ能力が高いと、特定の花粉親と採種親との間の子供が他とは大きく異なった性質を示す可能性が高い。採種親ごとの花粉親の効果に差があるとすると、その効果の差は家系内の誤差ではなく、家系間の差を大きくする方向に働く。これらによって、花粉親が完全にランダムであって、その効果が無視できる場合にくらべ、見かけ上、採種親の効果が大きくなり、家系間差が大きく評価されると考えられる。このため、家系間分散から推定した遺伝率は、特定組み合わせ能力が大きいほうが、高く評価される可能性がある。したがって、自然受粉家系ではヤング率、容積密度の方が胸高直径よりも遺伝率が高く推定されたものと考えられる。また、このことによって、ヤング率と容積密度では、自然受粉家系から狭義の遺伝率を推定した場合に、過大に評価する危険性があることを指摘できる。

このように容積密度、ヤング率、心材含水率は胸高直径にくらべて家系遺伝率が高い。しかも、ヤング率と心材含水率は、家系間の変異幅も大きい。このことから、胸高直径と同等か、より高い育種効果を期待できる。しかし、ヤング率、容積密度では特定組み合わせ能力が高いことを示す結果が得られている。このことは、ヤング率、容積密度について高い育種効果を確実に得るためには、優れた子供を作る親の間で人工交配する、あるいは優れた子供を作る1組の親だけで採種園を構成するバイクロナル採種園の利用などを考慮しなければならないことを示唆する。

一方、クローンでは、いずれの性質も実生にくらべて高い遺伝率を示した。最も高い広義の遺伝率はヤング率の0.86であり、最も低かったのは胸高直径の0.44であった。また、心材含水率、心材容積密度、辺材容積密度の広義の遺伝率はそれぞれ0.66、0.60、0.51であった。本研究において得られた、木材性質に関する家系、狭義、広義の遺伝率を整理し、一覧表としてTable 8-1に示す。環境、家系数やクローン数、家系及びクローン構成の違いがある。しかし、クローンの広義の遺伝率は、いずれの性質においても実生の遺伝率にくらべて高いこと、ヤング率の広義の遺伝率がもっとも高いことが明らかである。このように、相加的遺伝分散と非相加的遺伝分散の双方を利用できるクローンが、高い育種効果を得るうえで有利であることを示す結果が得られた。

遺伝率の高いクローンの木材性質について、選抜母集団の平均値に対する遺伝獲得量の比率を「改良率」と定

義した値を求め、その大きさを性質の相互間で比較した。その結果によると、改良率はヤング率が18%、心材含水率が16%を示した。また、胸高直径、心材容積密度、辺材容積密度の改良率はそれぞれ8%、7%、5%であった。このように、クローンに関する育種技術を用いることにより、木材性質に関する高い育種効果が

Table 8-1 Broad-sense heritabilities, family heritabilities, and narrow-sense heritability for wood properties of *Cryptomeria japonica* in results of this study.

Wood properties	Family heritabilities	Narrow sense heritabilities	Broad sense heritabilities
Dynamic modulus of elasticity	0.29	0.17	0.86
Moisture content of heartwood	0.47	0.14	0.66
Wood density of sapwood	0.14	0.00	0.51
Wood density of heartwood	0.44	0.07	0.60
Diameter at breast height	0.00	0.38	0.44

が得られる。とくにヤング率は、育種効果が高いことがわかった。改良率算出の基礎となった遺伝獲得量は、木材性質について供試した12クローンの中から上位2位に評価されるクローンを選抜するものとして求めた。ヤング率の遺伝獲得量は、 $13\text{kgf} \times 10^3/\text{cm}^2$ であった。スギ材を構造用製材として利用することを仮定した場合に求められる品質・性能は、「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」の「機械的等級区分製材」にあてはめることで評価できる。供試12クローンの全平均値 $53\text{kgf} \times 10^3/\text{cm}^2$ は、「機械的等級区分製材」にあてはめると最下級のE50に位置づけられる。しかし、遺伝獲得量と、12クローンの全平均値との合計である改良後のヤング率 $66\text{kgf} \times 10^3/\text{cm}^2$ は、1階級上のE70に位置づけられる。すなわち、クローンに関する育種技術に基づき、ヤング率について利用上の品質基準で評価することのできる具体的な育種効果が得られた。

心材含水率については、広義の遺伝率、遺伝獲得量ともにヤング率で得られた成果に近い大きな値が得られた。その遺伝獲得量は、心材含水率を25%低下させるほどの育種効果が期待できるものである。この数値は、育種的にみると大きな成果である。しかし、利用面での成果にむすびつけるには現在のところ、具体的に評価する基準がない。将来、乾燥特性をにらんだ基準が作られた場合には、具体的な育種効果に基づく成果として、実用的にも結びつく成果といえよう。また、容積密度については、胸高直径にもまして広義の遺伝率が高い。しかし、変異幅が小さいため、遺伝獲得量は胸高直径と同じか、あるいは劣るという結果になった。ところで、パルプ収量などに関連の深い木材実質の量は、容積密度と材積の積である。そこで、容積密度は成長量と組み合わせて改良することによって、木材実質の収量を改善できる可能性がある。パルプ利用においては、この研究の成果が活かせるであろう。現在は、スギをパルプ原料として利用することは比較的少ない。しかし、将来、木材の需給環境が変化した場合には、重要な育種成果につながる可能性がある。これらの研究成果からみると、クローンの木材性質について、①ヤング率、心材含水率に関しては高い育種効果が期待できること、②容積密度単独では目に見えた改良効果はなくとも成長形質に関する改良とあわせて、パルプ材生産、あるいはバイオマスをめざした木材実質の生産量の向上をはかることが可能であることがわかった。

このように、クローンの木材性質に関しては高い育種効果が得られた。とくにヤング率の育種効果は、利用上の木材品質表示の基準、「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」の「機械的等級区分製材」において、1ランク引き上げるものであった。また、クローンは組み合わせ能力を考慮しなくても良い。したがって、特別な配慮なしに育種効果を得ることができる。これは、木材生産現場と木材利用の両面で大きな成果として期待できるものである。これまでスギ材が利用面の要求する品質を満たせなかった部分について、クローンによる育種技術で改善できるほどの効果が期待できることを明らかにした。

8. 2 木材性質のバラツキの育種による制御

スギの木材性質のバラツキの大きさは、それ自体が利用上の大きな問題である。このことに関して、それぞれの家系やクローン別に植栽することによって、林分内のバラツキを減少させることが期待できる。

供試材1（一般の実生林分）について、木材性質のバラツキを検討した結果、家系を区分しない通常の実生林分における木材性質のバラツキを代表していると考えられた。これは、市場に流通する木材の性質のバラツキの実態であるともいえる。これに対して、供試材2（自然受粉家系）、供試材3（人工交配家系）は複数の自然受粉家系、人工交配家系から構成されている。このため、供試材1（一般実生林分）で示した木材性質のバラツキの実態に対し、家系を区分することによる木材性質のバラツキの違いを評価することができる。供試材2と供試材3はともに、家系を込みにした林分全体の変動係数は、供試材1の林分全体の変動係数とほぼ一致した。このことから、供試材2と供試材3について、家系を区分することによるバラツキの違いは、家系別に造林した場合の林分内の木材性質のバラツキを示すものとして期待できる。そこでこのことを、自然受粉家系、人工交配家系それぞれにおける変動因別の分散寄与率によって検討した。家系別に造林した場合には、家系間の分散を考慮する必要がない。すなわち、バラツキを減少させることが期待できる部分は、家系間の分散寄与率にあるともいえる。このことから、家系間分散の寄与率が大きいほどバラツキの減少も大きいことが期待できる。

検討の結果は、最も大きい家系間分散を示したヤング率においてもその値は17%であり、家系間分散を差し引いたあとに残る誤差と交互作用の分散は83%であった。したがって、実生では家系別に造林したとしても、現状の家系の区別を考慮しない実生林分にくらべて、バラツキを小さくする効果として大きな期待はできない。

一方、単一クローンで造林された林分は、単一の遺伝子型で構成されている。このため、両親の遺伝子型が関与する実生林分にくらべて、木材性質のバラツキを小さくすることが期待できる。クローン別に植栽した供試材5（地域差検定林）の之内浦試験地の林分全体の変動係数は、胸高直径を除くいずれの性質においても供試材1（一般の実生林分）の同様の変動係数とほぼ一致した。このことよって、クローンを区分することによるバラツキは、クローン別に植栽することによるバラツキの違いを示すものとして期待できる。そこで、クローンの木材性質のバラツキについて、変動因別の分散寄与率によって検討した。クローン間に起因する分散寄与率は、クローン別に植栽した場合に考慮しなくて良い部分である。すなわち、バラツキを減少させることを期待できる部分はクローン間の分散寄与率にあるといえ、この分散寄与率が高いほどバラツキの減少効果も高いといえる。

その結果、クローンではいずれの性質においても、クローン間の分散が大きく、誤差と交互作用の分散は小さかった。とくに、ヤング率では、クローン間分散の寄与率が86%と高い値を示し、誤差および反復とクローンの交互作用の分散の寄与率の合計は、わずか14%にすぎない。ヤング率は、クローンと実生のいずれにおいても、誤差と交互作用の寄与率が小さかった。そのヤング率において、クローンの場合の誤差分散と交互作用分散の合計の寄与率は、実生の場合にくらべて1/6の大きさである。環境条件、家系数やクローン数、供試クローンや家系の構成に差はあるものの、単一クローンで構成された林分は、実生にくらべてバラツキをより小さくさせる効果があるといえる。

また、精英樹クローンは成長量や樹幹形態などについて、すでに選抜を受けている。このことから、精英樹は遺伝的な多様性を減少させていると考えられる。それにもかかわらず、木材性質に関しては一般の実生林分と同等のバラツキがあった。また、供試した12クローンの木材性質に関する変異幅、変動係数は、林木育種センター

内のクローン集植所から採取した 129 クローン、258 本のスギ材の変異幅、変動係数とほぼ一致した。したがって、供試材 5（地域差検定林）は、精英樹群がもつバラツキの大きさを十分反映しているものとして期待できる。これらによって、精英樹クローンは、木材性質に基づいて優良クローンを選抜する余地を残しているといえよう。いいかえれば、精英樹から望ましい木材性質を備えた個体を選抜することで、成長、樹形、木材品質ともに優れた造林木を創り出すことが可能であるともいえる。

このように、単一クローンで造林した場合にはバラツキが極めて小さくなり、この傾向はとくにヤング率で顕著であった。また、クローンのヤング率は構造用製材としての利用を仮定した場合、利用面における実際の品質表示によって評価できる具体的な育種効果が得られている。したがって、利用に適した性質を持ち、しかも性質が均一な木材の生産を予め意図して造林すること、すなわち「品質管理型木材生産」の可能性を示唆するものである。さらにヤング率は「品質管理型木材生産」のなかで、林業と林産業との共通の品質表示、すなわち材質指標として効果的に機能することが期待できる。

8. 3 利用に適した木材生産への育種的研究成果の応用

クローンに基づいた林業では木材性質はバラツキが小さく、しかも高い育種効果が期待できること、とくに育種技術導入の効果はヤング率で顕著なことが明らかになった。これは、林分単位の研究成果であり、他の林分において同様の成果が得られることを保証するものではない。そこで、ヤング率について、複数林分を含めた広い範囲に拡張したクローンの育種効果を検討した。検討には、九州をほぼ網羅する 6 ヶ所の地域差検定林から採取した供試材 5 を用いた。複数林分を含めた広い範囲に拡張した育種効果は、6 林分を込みにした広義の遺伝率に基づいて評価した。6 林分を込みにした広義の遺伝率は、本研究において式 6－1 で定義するものである。

式 6－1

$$h^2 = \sigma_c / (\sigma_c + \sigma_{cs} + \sigma_{cr} + \sigma_e)$$

ここで、 h^2 ：広義の遺伝率、 σ_c ：クローンによる分散、 σ_{cs} ：クローンと林分との交互作用による分散、 σ_{cr} ：クローンと林分内反復との交互作用による分散、 σ_e ：プロット内の分散である。

ヤング率について、式 6－1 から求めた 6 林分を込みにした広義の遺伝率は 0.7 であった。6 林分を込みにした広義の遺伝率は、本研究において初めて得られるものであり、他に比較する対象がない。同じ供試材 5 について、林分別に求めた広義の遺伝率は、ヤング率が 0.86、心材含水率が 0.66、辺材容積密度が 0.51、心材容積密度が 0.60、胸高直径が 0.44 であった。これらとくらべると、6 林分を込みにしたヤング率の広義の遺伝率 0.7 は高い値であったといえよう。複数林分を含めた広い範囲に拡張した育種効果は、式 6－1 にしたがった広義の遺伝率と 6 林分の全平均値から求めた選抜差とによって求めた遺伝獲得量によって評価できる。上位 1/6 を選抜すると仮定したときの遺伝獲得量は $10\text{kgf} \times 10^3/\text{cm}^2$ であった。12 クローン全体の平均値は $50\text{kgf} \times 10^3/\text{cm}^2$ であり、遺伝獲得量によって向上したヤング率は $60\text{kgf} \times 10^3/\text{cm}^2$ である。構造用製材利用を仮定して、力学的性能を表示する「機械的等級区分製材」にあてはめると、改良前のヤング率は E 50、改良後のヤング率は E 70 に格付けされる。これは、等級の 1 段引き上げに相当する育種効果であった。また、この育種効果は林分単位で得られた結果にほぼ匹敵するものであった。すなわち、クローンに関する育種技術では、ヤング率について、九州をほぼ網

羅するほどの広い範囲に拡張した場合においても、林分単位と同じ育種効果が得られることがわかった。このように、九州内全域の広い範囲を含む遺伝獲得量については、本研究において初めて明らかにされるものである。

クローンのヤング率は、九州全体をほぼ網羅する広い範囲で高い育種効果が得られることが、本研究によって明らかになった。また、これまでの林木育種事業によってスギ、ヒノキでは材積成長に関して8%以上の向上が期待できるとされている^(林木育種センター内部資料)。さらに、本研究において精英樹クローン群は木材性質に関して実生に匹敵する変異幅を持つことがわかった。これらから、これまでに得られた成長に関する育種効果を基礎にし、さらに木材性質を利用に適したものに改良することを考える。そこで、肥大成長の指標である胸高直径とヤング率との間の相関関係を検討した。6林分の平均値によってヤング率と胸高直径の相関係数を求めた。その結果、有意な相関係数は認められず、両者が独立した性質であることを示す結果が得られた。このことによって、クローンに基づく育種技術によって、ヤング率と胸高直径を同時に改良することのできる可能性がある。

これらの結果は、広い範囲で平均的に得られる育種効果を示す。このことから、クローンと林分の交互作用が大きい場合に、林分によっては期待するほどの育種効果が得られないおそれもある。この点において、エバハートとラッセルの手法で解析した結果から、ヤング率はクローンと林分との交互作用は小さいことがわかった。また、林分の相互間の相関係数も林分間の距離にかかわらず常に高い値を示す結果を得た。これらによって、ヤング率についてはどの林分においても、常に同じクローン相互間の順位づけと遺伝獲得量が得られることが明らかである。これらは、クローンに基づいた林業では、九州地方を一つの「育種区」としてヤング率に関する本研究の成果を適用できる可能性を示すものである。ただし、胸高直径については林分とクローンとの交互作用が大きいこともわかっており、地域区分に留意しなければならない可能性もある。このことから、ヤング率と胸高直径を同時に改良する場合は、胸高直径の地域区分に影響されることも考えられる。

このように、クローンのヤング率について、今回供試した範囲では地域の区分を考慮せずに九州全体を対象として育種事業を進められることを明らかにした。

8. 4 育種的研究成果を林業へ応用する試み

本研究の成果によると、クローンのヤング率は育種効果が高く、しかもバラツキを減少する効果が高い。このことから、利用に適した性質を備え、しかも性質が均一な木材の生産を意図して造林する「品質管理型木材生産」は、クローン林業を導入することによって具体化すると考えられた。さらに、育種的手法による木材の「品質管理」法として、収穫された素材のヤング率を植栽苗の親クローンのヤング率から推定する方法について考察した。

親クローンのヤング率と素材のヤング率の関係について、①クローンの広義の遺伝率が親クローンと子供クローンの相関係数に相当すること、②親クローンと子供クローンはおなじ遺伝子型であるため、環境がおなじであればバラツキはおなじになることを仮定できる。これらを利用し、親クローンの木材性質と素材の性質の相互間における回帰式を作成した。回帰式1は、九州地方全体でヤング率に適用できる親クローンと収穫された素材の間の関係式である。

$$\text{回帰式1: } y = 14.8 + 0.7x$$

ここで y : 収穫時の木材のヤング率, x : 植栽するクローンのヤング率である。

回帰式1によって、木材工業では植栽クローンのヤング率から原材料となる木材のヤング率を容易に推定できる。また、林業経営者は利用上有利な木材を生産できる種苗を選択して造林することができる。これまで木材の性質は、ある程度の林齢に達した立木^(高田:1994)、あるいは、素材となって知ることができた。これに対し、遺伝的母数に基づいた推定法は、造林時点において木材性質を予測し、その情報を林業・林産業の経営に役立てることを可能にするものである。

8. 5 育種的研究成果と施業との関係

施業も木材性質に影響する重要な因子と考えられる。施業と木材性質の関係について、植栽本数を変えてクローンを植栽した密度試験地の供試材4の年輪構造から検討した。その結果は、年輪幅と年輪ごとの平均密度に植栽本数の違いによる明らかな変化が認められた。密植になるほど、年輪幅は減少し、年輪ごとの平均密度は上昇する傾向にあることがわかった。しかし、晩材部に関しては、晩材幅、晩材密度ともに、植栽本数の違いによる変化は認められなかった。これらの結果によると、植栽本数の違いによる年輪構造の変化について、次のように考えることができる。植栽本数が多いほど肥大成長は抑制され、年輪幅が縮小する。しかし、晩材幅は変化が小さいため、相対的に晩材率が上昇する。多くの針葉樹で晩材率と容積密度の相互間に高い相関が認められている^(野堀他:1988, 藤澤他:1989, 小田他:1990, 高田他:1992)。したがって、晩材率の上昇にともなって平均密度が上昇すると考えることができる。晩材率の経年変化には、平均密度と同様の傾向が認められ、密植になるほど上昇したことも、この考えを裏付けるものであった。

このように、植栽本数の違いもまた、木材性質に影響が強いことを示す結果が得られた。このことから、木材性質に関する育種的研究成果について、植栽本数が異なる場合には、同様の成果が得られない可能性が危惧される。そこで、植栽本数の違いと育種効果の関係を検討した。

年輪幅が広いクローンと狭いクローンの2クローン間で、植栽本数の違いによる年輪構造への影響の違いを検討した。2クローンともに、密植になるほど年輪幅は減少し、平均密度は上昇する傾向にあった。しかし、2クローンの相互間における年輪幅と年輪ごとの平均密度の大小関係はまったく変化しない結果が得られた。また、供試クローン全てによる遺伝的母数の分析から、年輪幅、年輪ごとの平均密度、晩材幅、晩材密度いずれの性質についてもクローンと植栽本数の交互作用は全く認められなかった。広義の遺伝率については、いずれの木材性質に関しても植栽本数との間に一定の傾向は認められなかった。これらの結果によって、植栽本数の違いには年輪構造に影響するものの、いずれの性質においても、クローンの順位評価や遺伝的母数には影響しないことがわかった。すなわち、一般的な植栽本数の林分において利用に適していると評価されたクローンは、異なった植栽本数においても高い評価が得られることを期待できる。

このように、クローン林業では育種の成果が施業によってそこなわれることはなかった。さらに、適切な施業と育種技術の組み合わせによって、育種効果をより高める可能性がある。

8. 6 クローン林業と実生林業の相互関係

本研究において、性質が均一な木材の生産を意図して造林する「品質管理型木材生産」がクローン林業によって具体化することを提示した。とくにヤング率は育種技術の導入によって、効果的に改良できることがわかった。

一方、わが国の林木育種事業は、採種園の母樹を選抜することによって林分の素質を改善する集団選抜法を中心にして進めてきた。また、九州地方及び関西地方の一部をのぞき、スギは実生で造林するのが一般的である。採種園産種子に基づく実生林業の目標とするところは、比較的単純な遺伝子型で林分を構成するクローン林業とは必ずしも一致しない。したがって、両者の関係について考察しておく必要がある。

林木育種において、これまでの集団選抜とクローン林業に基づいた「品質管理型木材生産」は対立するものではない。集団選抜では、集団の変異幅を維持することが育種効果を維持する上で重要である。この点において、「品質管理型木材生産」とは相反するようにみえるが、これは互いを否定するものではない。「品質管理型木材生産」では効果的に木材の品質を管理するため、個々の林分の変異は小さい方がよい。しかし、優良クローンを選抜し、高い遺伝獲得量を得るためには、選抜差を大きくとることのできる変異幅の大きな集団が必要である。すなわち、実生造林地域では、本研究で明らかにした実生の木材性質の育種的成果を利用し、大きな変異を含んだまま集団選抜によって木材性質を利用に適した方向へ誘導する。この実生集団は、「品質管理型木材生産」におけるクローン選抜の重要な母集団として期待できる。また、容積密度、ヤング率について、特定組み合わせ能力が高い結果が得られている。特定組み合わせ能力についても、積極的に利用することを考えなければならない。優れた性質を持つ子供をつくる組み合わせ間で人工交配をおこない、これによってよりすぐれた性質を持つ家系を創出する。これらの家系もまた、優れたクローンを選抜するための重要な母集団として機能する。すなわち、これまでの集団選抜に基づいた育種事業によって、実生林分の木材性質をより利用に適したものに誘導する。同時に、実生林分は優れたクローンを選抜する母集団としての機能を持つ。

本研究において明らかにしたように、均一な木材生産の観点では実生林分の遺伝的な多様性は不利である。その一方で、遺伝的多様性は気象害、病虫害その他の災害による壊滅的な被害を回避し、林分の安全性を保証するものである。また、実生はクローンにくらべて増殖に要するコストが低い。さし木の育苗コストは実生の1.3～1.6倍であることが、ノルウエースプルースで報告されている (Talbert C. B. et. al.: 1993)。実生の育種効果について、木材性質に関しては、成長形質と同等かそれ以上の育種効果が得られることが本研究から明らかになった。しかし、木材工業と林業の連携をめざした「品質管理型木材生産」は、クローン林業の導入によってなり立つことは、本研究の結果から明らかである。クローン林業と実生林業の得失の比較を Table 8-2 に示す。このように、クローン林業と実生林業は互いに優劣を付けられるものではなく、それぞれに得失が存在する。財産保全的な要素の強いこれまでの林業経営を指向する場合には安全性を重視した実生林業を、より積極的に林業経営を進めたい場合には、より合理的なクローン林業による「品質管理型木材生産」を選択する余地がある。すなわち、実生とクローンのどちらに基づいて林業経営をおこなうのかは、その得失によって林業経営者が判断すべきである。

Table 8-2 Comparison between clonal forestry and seedling and seedling forestry on their merits and demerits.

Items	Clonal forestry	Seedling forestry	
Uniformity of lumbers	○	×	Results of this study
Genetic gains for wood properties	○	△	
Safety to natural disasters	(△)	○	Results in previous papers
Costs for propagation	(△)	○	

Legend : ○ ; Superior, × ; Inferior, △ ; Average
() ; in the case of additional special devices

8. 7 クローン林業による「品質管理型木材生産」の展望と留意点

クローン林業にもとづく「品質管理型木材生産」では、利用に適した性質を備えた個体を選び、クローン増殖して造林する。また、利用側では植栽した種苗の性質から木材の性質を推定し、最適な木材の得られる品種を選択する。Table 8-3 は供試材 5（地域差検定林）内之浦試験地の測定結果について、各木材性質ごとにクローンの順位を求めたものである。この表は、種苗の選択に関する具体的な例を示すために作成した。この表において、各性質に関する順位づけが、○は上位 4 位以内、×は下位 4 位以下であることを示す。また、それぞれの性質は独立の形質であることを示す結果が得られている。例えば、ヤング率を基準にして選択するのであれば、八女 12 はヤング率、心材含水率にすぐれ、他の性質については平均的なところから、容積密度、心材含水率、生長量に影響を与えず、ヤング率を改良できるクローンとして推奨できる。密度を基準にして選択するのであれば、①生長量を確保しつつ密度の高いクローンを選ぶ場合は宮崎暑 6 が選択され、②生長量は劣っても心材含水率が低く密度の高いクローンを選ぶ場合は竹田 11 が選択される。今後、数多くの木材性質、クローンについて情報が集積されることによって、選択の範囲はさらに広がる。また、実際にクローンを選択する場合は、各性質の偏差値の合計、あるいは選抜指数に従う方がより合理的であろう。

木材工業の求める木材を生産するうえでは、クローン林業は高い機能を発揮する。その一方で、クローン林業による「品質管理型木材生産」を実用化するためには、Table 8-3 で示したように①災害に対する安全性の確保、②安価な種苗の安定供給に関する技術が確立されなければならない。これらはクローン林業の重要な留意点であり、従来の知見から考察をくわえた。

クローン利用の危険性について、実生家系の持つ変異幅が安全に結び付くのではなく、使用する家系数、クローン数が重要であることが指摘されている^(大庭:1978, 1993A)。これによると、実生林分であっても使用する家系数が少ない場合には、数多いクローンよりも危険度がかえって高くなるとしており、クローン林分では 20 クローン程度が混在すれば安全であるとしている^(大庭:1978)。すなわち、クローン林分であっても 20 以上のクローンが混在することによって、実生林分となら変わらない安全性が得られることを示唆する。一方で多数のクローンを混合して造林することは、クローンの有利点である均一性を損なうことになる。これを解決する手段として、同じ木材性質を示すが近縁度は低いクローンについて、少なくとも 20 クローン以上を含む集団をつくることが考えられる。これらのクローンを混合して造林することによって、

特定の木材性質に関する均一性と安全性を両立できる可能性がある。しかし、この場合は、遺伝子型の異なる個体が隣り合うので、競争効果が強く働く。このため、木材性質の均一性がそこなわれるおそれもある。このことについて、いまだ実証成果が得られていない。このことは、クローン林業による「品質管理型木材生産」を実用化する過程において、明らかにしていかなければならないだろう。また、Libby は小面積モザイク植栽を提唱した^(W. J. Libby: 1983)。これは 5ha 以下の小さな面積で単一クローンを植栽するが、それぞれの部分は

Table 8-3 Ranking among plus-tree clones based on wood properties in clonal test stand established at Uchinoura.

No.	Clone names	WOS	WOH	MCH	Ed	DBH
1	Yame 12			○	○	
2	Fujitsu 24	×		×	○	×
3	Karatu 6	○	○	○	×	×
4	Fukuokasyo 2		○	○	×	
5	Taketa 11	○	○	○	×	×
6	Hita 1				○	
7	Hiji 1	×			○	×
8	Higashiusuki 5		×	×	×	○
9	Kuma 5	×	×			○
10	Aira 4	×	×			○
11	Kimotuki 2	○	×	×		○
12	Miyazakisyo 6	○	○	×		

Legend: WOS: Wood density of sapwood, WOH: Wood density of heartwood, MCH: Moisture content of heartwood, Ed: Modulus of elasticity, DBH: Diameter at breast height, ○: Four clones ranked to the highest grade, ×: Four clones ranked to the worst grade.

異なったクローンを割り当てる。そのために、林分単位では性質の均一性を確保できるうえに、まとまった面積で見ると多くのクローンが存在するので安全性が高い。わが国では民有地の戸数、面積ともに89%は5ha以下の小規模所有者で占められている(林野庁監修:1989)。そのため、本来、幾つのも地域品種がモザイクのように植栽されている。したがって、現在進められている流域単位の施業計画立案にクローンのモザイク的配置に関する考えを導入することによって、多数クローンの小面積モザイク植栽を容易に実現できる可能性がある。Fig. 8-1にモザイク植栽の概念を示す。

Note : Patterns of sections showed differences in planted clones.

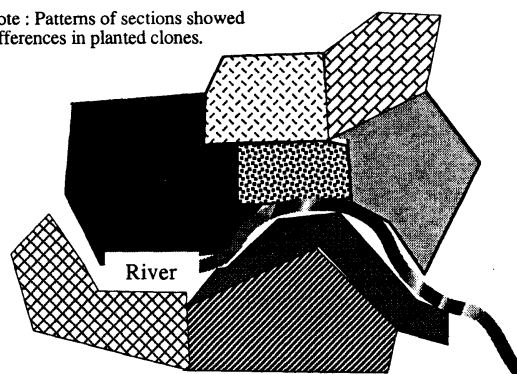


Fig. 8-1 A diagram of the concept of Libby's mosaic planting.

クローン林業を安定して進めていくためには、クローン種苗の効率的な大量増殖法も重要な技術である。さきに述べたようにクローン種苗は実生にくらべて増殖コストが高く、結果として一般的に苗木の価格が高い。さし木と実生の間の苗木コスト差が大きい場合には、クローン林業の利点をそこなうおそれもある。幸い、九州のさし木林業が示すように、スギのクローン増殖に関してはこれまでのさし木に基づいた増殖技術で十分に対応できるであろう。しかし、交配苗木のクローン化、クローン林業による「品質管理型木材生産」の他の樹種への拡大を考慮すると、従来のさし木技術だけで対応することはできない。幼齡木とヘッジング技術の組み合わせ、Meristematic Nodules^(Aitken J. and Davies H. H. 1991)の応用などの革新的な増殖技術も含めて、より確実で効果的なクローン増殖技術、しいてはより低コストなクローン増殖技術を継続的に開発していかなければならない。

このように、クローン林業による「品質管理型木材生産」は、本研究を含め、これまでの林木育種の成果をもとに、林木の遺伝的な変異をより積極的に、かつ効果的に利用しようとするものである。病虫害などの災害に対しては、近縁度が低く性質の似かよったクローン群の混合植栽、単一クローンの小面積モザイク植栽などの工夫によって安全性を確保する。これによって、クローンの特質を生かした林業経営を実現できると考えられる。しかし、今後、施業と木材性質との定量的な関係、性質はおなじだが近縁度の低いクローンを混植した場合の競争効果の影響などを明らかにすること、低コストクローン増殖技術を開発していくことが「品質管理型木材生産」をより具体化する鍵である。

摘 要

本研究によって得られた結果は、次のように要約できる。

1 実生における木材性質の育種効果とバラツキの制御

- (1) 実生では採種園方式に基づく集団選抜によって、特にヤング率、心材含水率では成長量と同等かそれ以上の育種効果が得られる。しかし、その育種効果は利用面で改良が必要とされる範囲を下回るものである。
- (2) 実生では、ヤング率と容積密度に関して、特定組み合わせ能力が大きいことを示す結果が得られた。このことは、育種効果を確実に得るため、バイクロナル採種園や人工交配など特別に配慮しなければならない

ことを示唆する。

- (3) 実生林分は、いずれの性質においても、誤差と交互作用の分散寄与率が80%を超える。すなわち、家系別に造林しても分散の80%以上が残される。このため、木材の性質のバラツキを減らすことに関して、高い効果を期待できない。

実生における木材性質の育種効果は、成長形質と同等、もしくはより高い。しかし、特定組み合わせ能力が高いため、育種効果を確実にするために特別な配慮が必要である。また、バラツキが大きいので、均一な木材の生産に関して高い効果が期待できない。

2 クローンにおける木材性質の育種効果とバラツキの制御

- (1) クローンの木材性質、とくにヤング率は、クローン間の変異が大きく、しかも、広義の遺伝率が高い。したがって、高い育種効果を期待できる。また、クローンは組み合わせ能力を考慮する必要がないので、特別な配慮なしにすべての育種効果が得られる。
- (2) クローンの木材性質は誤差分散と交互作用分散の寄与率の合計が小さい。とくに、ヤング率は14%と極めて小さい。したがって、単一のクローンで造林したばあい、バラツキの減少に関して高い効果を期待できる。
- (3) (1)、(2)項の結果によって、育種技術によって木材性質を利用に適したものに改善し、しかも、できるだけ均一な性質の木材を生産するためには、実生よりもクローンの方がより適している。

これらの結果を具体的な成果に結びつけるには、例えば構造用製材を指向した木材生産について、クローンのヤング率を材質指標として「品質管理型木材生産」を行う可能性を示唆する。

3 育種的研究成果に基づいた「品質管理型木材生産」

- (1) 九州をほぼ網羅する広い地域に適用できるヤング率の広義の遺伝率は0.7である。この値は、林分単位で求めた広義の遺伝率と同等かそれ以上の大きさである。
- (2) (1)項の広義の遺伝率から求めたヤング率の遺伝獲得量は、力学的性能を表示する「製材の機械的等級区分」に対して、等級を1段引き上げることに相当する育種効果が得られる。また、九州全体を一つの育種区として、育種効果を適用できる可能性が示された。このことは、育種コストの軽減につながる成果である。
- (3) クローンでは、ヤング率と胸高直径の間には有意な相関関係は認めなかった。したがって両者は独立した性質であることを示す結果が得られた。このことは、クローンに基づく育種技術によって胸高直径とヤング率を同時に改良できる可能性を示す。ただし、胸高直径にはクローンと林分間の強い交互作用が認められており、クローンの評価の適用範囲が胸高直径によって制限される可能性に留意すべきである。
- (4) クローンは①広義の遺伝率は親クローンと子供クローンの相関係数と一致すること、②親クローンと子供クローンそれぞれの分散は等しいとみなせることを利用して、親クローンと子供クローンの回帰式が作成できる。これによって、素材の性質を苗木の親クローンの性質から予測することができる。
- (5) クローンに基づく林業では、育種と施業は相反するものでなく、両者を組み合わせることによって、より高い育種効果が得られる。

このように、クローン林業は高い育種効果が得られ、木材性質のバラツキを減少させることに効果がある。したがって、木材利用に適合した木材生産には、クローン林業の導入が必要である。そして、木材の物理定数の1つであるヤング率は、林業と林産業を連携させる品質表示、すなわち材質評価の指標として効果的であることが

わかった。クローンの育種と、これまでの実生に基づく集団選抜法とを組み合わせることで、一層の育種効果が得られるであろう。

謝 辞

元林木育種センター育種部長の栄花茂博士、元関東林木育種場長の塩崎實氏には本研究に着手するきっかけをいただいたことに心から感謝させていただきます。また、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森林総合研究所研究管理官の太田貞明博士には言葉に尽くせないご恩をいただき、心より感謝させていただきます。研究の遂行と論文の作成に際して、終始ご指導とご助言、ご校閲をいただいた九州大学農学部教授堤壽一博士に心から感謝させていただきます。本論文のとりまとめにあたっては、九州大学農学部教授斎藤明博士、九州大学農学部助教授小田一幸博士、ならびに九州大学農学部助教授白石進博士から懇切なるご校閲とご助言をいただいたことにたいして心から感謝させていただきます。九州大学農学部助手の高田克彦博士には、多くのご助言とご助力いただいたことに感謝させていただきます。本研究を実行するにあたって多大なご配慮とご支援をいただいた林木育種センター育種部長田島正啓博士、ならびに森林総合研究所木材利用部材質研究室長平川秦彦博士に心から感謝させていただきます。林木育種センター九州育種場育種課長の栗延晋博士（当時関東林木育種場育種第一研究室長）には、解析プログラムの使用にあたって多大なご助力とご助言をいただきましたことに心から感謝させていただきます。林木育種センター関西育種場の育種第2研究室長の西村慶二氏（当時九州育種場主任研究官）には、材料の選定などにあたって貴重なご助言をいただきましたことに心から感謝させていただきます。さらに、林木育種センター九州育種場元場長の斎田佳昭氏、育種研究室長の戸田忠雄氏をはじめとする九州育種場職員の各位、関東林木育種場（当時）育種第一研究室各位、森林総合研究所木材利用部材質研究室各位、同木工室各位、東京営林局、大子営林署、笠間営林署、熊本営林局、菊池（現熊本）営林署、玖珠営林署、長崎営林署、矢部営林署、小林営林署、内之浦営林署の各位には供試材の採取、試験体の加工にあたって多大なご助力をいただきました。熊本県林業研究指導所木材加工部の各位には、測定機材の利用について便宜をはかっていただきました。以上の多くの方々にたいして、厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 明石孝輝：川村忠士：河崎久男：1987, スギの幹と枝の諸形質に対する植栽密度とクローンの影響, 日林誌, 69 (4), 136 ~ 145
- 2) Anderson E. A. : 1951, Tracheid length variation in conifers as related to distance from pith, Journal of Forestry, 49, 38 ~ 42
- 3) Bey C. F. : 1979, Geographic Variation in *Juglans nigra* in the Mid western United States, Silvae Genetica, 28(4), 132 ~ 135
- 4) Buijtenen J. P. VAN : 1969, Controlling wood properties by forest management, TAPPI, 52(2), 257 ~ 259
- 5) Clear J. B. ST. : Kleinshmit J. : 1986, Genotype - environment interaction and stability in ten-years height

- growth of Norway spruce (*Picea abies* karst.), *Silvae Genetica*, 35(5-6), 186 ~ 177
- 6) Cown D. J.: 1973, Effects of severe thinning and pruning treatments on the intrinsic wood properties of young radiata pine, *New Zealand Journal of Forestry Science*, 3(3), 379 ~ 389
 - 7) Cown D. J.: 1974A, Physical properties of Corsican pine grown in New Zealand., *New Zealand Journal of Forestry Science*, 4(1), 76 ~ 93
 - 8) Cown D. J.: 1974B, Comparison of the effects of two thinning region on some wood properties of radiata pine., *New Zealand Journal of Forestry Science*, 4(3), 540 ~ 551
 - 9) Cown D. J.: 1978, Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees, *New Zealand Journal of Forestry Science*, 8(3), 384 ~ 391.
 - 10) Cown D. J. : McConchie D. L.: 1981A, Effect of thinning and fertilizer application on wood properties of *Pinus radiata*, *New Zealand Journal of Forestry Science*, 11(2), 79 ~ 91.
 - 11) Cown D. J.: 1981B, Wood density of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* grown in Fiji., *New Zealand Journal of Forestry Science*, 11(3), 244 ~ 253.
 - 12) Cown D. J. : McConchie D. L. : 1983, Wood density as an indicator of the bending properties of *Pinus radiata* poles, *New Zealand Journal of Forestry Science*, 13(1), 87 ~ 99.
 - 13) Aiteken - Christies and Davies H. E.: Progress towards automation in the tissue culture of juvenile Radiata Pine, *Proceedings FRI/NZFP Forests LTD - Clonal Forestry Workshop*, FRI Bulletin No. 160, 81 ~ 83, 1991
 - 14) Eberhart S. A. : Russell W. A. : 1966, Stability for comparing varieties, *Crop science*, Vol. 6 January - February, 36 ~ 40
 - 15) 海老原徹：1986，ストレスグレーディング，*木材工業*，41 (11)，538 ~ 539
 - 16) Echols RM. : 1973, Uniformity of wood density assessed from X-rays of increment cores, *Wood Science and Technology*, 7, 34 ~ 44
 - 17) 榎土勇：1994，“木材活用事典”，産業調査会事典出版センター，pp 738，547 ~ 576
 - 18) Faies A. : 1984, Spacing Interaction with genotype and with genetic variation of production and equality traits in a trial of seedlings and grafted clones of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), *Silvae Genetica*, 33(4-5), 145 ~ 152
 - 19) 深沢和三：1957，スギ樹幹内の材質変動に関する研究，*岐阜大農研報*，25，P. 47
 - 20) 藤澤義武：八川久：市村邦之：1989，スギにおける年輪構造の樹幹内変動，*日林関東支論*，41，91 ~ 94
 - 21) 藤澤義武：八川久：市村邦之：1989，スギの年輪構造にあたる成長の影響，*日林関東支論*，41，95 ~ 98
 - 22) 藤澤義武：1992A，育種による材質改良の可能性—スギの材質に関するクローン特性—，*林木の育種*，164，12 ~ 16
 - 23) Fujisawa Yoshitake: Ohta Sadaaki : Nishimura Keiji : Tajima Masahiro: 1992B, Wood characteristics and its genetic variations in Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Clonal differences and correlation between locations of dynamic moduli of elasticity and diameter growths in plus-tree clones., *木材学会誌*，38(7), 638 ~ 644
 - 24) Fujisawa Yoshitake : Ohta Sadaaki: Nishimura Keiji : Toda Tadao : Tajima Masahiro : 1993, Wood characteristics and its genetic variations in Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) II Variation in growth ring

components among plus-trees clones and test stands., 木材学会誌, 39(8), 875~882

- 25) Fujisawa Yoshitake: Ohta Sadaaki : Nishimura Keiji : Toda Tadao: Tajima Masahiro : 1994, Wood characteristics and its genetic variations in Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) III Estimation of variance components of the variation in dynamic modulus of elasticity with plus-tree clones., 木材学会誌, 40(5), 457 ~ 464
- 26) 藤澤義武：太田貞明：西村慶二：戸田忠雄：田島正啓：1995A, スギ心材含水率のクローンと林分による変異, 木材学会誌, 41 (3), 249 ~ 255
- 27) 藤澤義武：太田貞明：明石孝輝：1995B, スギの材質と遺伝 (第4報) 年輪構造のクローンと植栽密度による変異, 木材学会誌, 41 (7), 249 ~ 255
- 28) Fujisawa Yoshitake : Ohta Sadaaki: Nishimura Keiji : Tajima Masahiro : 1996, The effect of sites on growth ring components of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) clones., "Recent Advances in Wood Anatomy" - Proceedings of The 3rd Pacific Regional Wood Anatomy Conference in Rotorua New Zealand, New Zealand Forest Research Institute limited, pp 429, 292 ~ 294
- 29) 藤田晋輔：池田俊士：1986, 鹿児島大学農学部高隅演習林に植栽されたスギ材の材質と利用 (第1報) ヤクスギ材の機械的性質と比重の関係, 鹿大演報, 12, 57 ~ 67
- 30) 藤原新二：岩神正朗：1986, 四国産スギ材の成長と材質 (第二報) 一容積密度数一, 高知大学演報, 13, 43 ~ 52
- 31) 伏谷賢美：木方洋二：岡野健：佐道健：竹村富男：則元京：有馬孝：堤壽一：平井信之：1985, 木材の科学 2, 木材の物理, 分永堂, pp 286
- 32) Greed J. A. : 1993, "Development of Planting and storhing of rudiata pine. " Cloud Forestry, Springer-Verlag, pp 240, 149 ~ 157
- 33) Harris J. M. : 1970, Breeding to improve wood quality, Unasylya, 24(2-3), 32 ~ 36
- 34) 林弘也：松本昴：甲斐和夫：1980, 軟エックス線による木材密度測定, 九大演集報, 26, 127 ~ 139
- 35) 林知行：1989, 確率モデルによる修正加工材の性能予測 (第二報) ーラミナ MOR の模擬乱数発生法, 木材誌, 35 (12), 1144 ~ 1153
- 36) 林知行：1993, 木材工業からみた国内林業コスト問題ー針葉樹の構造用製材の日本農林木規格 (新製材 JAS) をめぐって, 森林総合研究所, pp 210, 192 ~ 199
- 37) 林知行：宮武敦：星通：1992, スギ複合集成材の強度特性 (第二報) ーフィンガージョイントされた低質ラミナと LVL から構成されたスギ複合集成材の曲げ及び引っ張り強度, 木材誌, 38 (3), 247 ~ 255
- 38) Henderson C. R. : 1953, Estimate of variance and covariance components, Biometrics, 9, 226 ~ 252
- 39) 久田卓興：1993, 建築用木材の乾燥コスト, 林業コスト問題の現状と展望, 森林総合研究所, 142 ~ 151
- 40) Hoyle P. J. : 1968, Back ground to machine stress grading, Forest Products Journal, 18(4)
- 41) 飯島泰男：1991, やぶにらみスギ木材学「木材空洞化論によせて」, ウッドミックス, 9 (10), 9 ~ 29
- 42) 石田俊広：1989, 例解生産情報システム, 同友館, pp 228, 152 ~ 155
- 43) 神谷文男：1985, 北米における MSR の現状, 木材工業, 40 (12), 581 ~ 585

- 44) 神谷文男：1994, 木材活用事典, 産業調査会事典出版センター, pp 738, 495
- 45) 加納猛：1954, 幹の平均比重を示す位置について, 林試研報, 134, 141 ~ 148
- 46) 加納猛：1960, スギの材質 (第一報) 釜淵産スギ, 林試研究報告 125, 95 ~ 119, 49 ~ 88
- 47) 加納猛：1961, スギの材質 (第二報) 西川産スギ, 林試研究報告 134, 115 ~ 139, 49 ~ 88
- 48) 加納猛：1973, 林木の材質, 林業技術協会, pp 168, 97 ~ 109
- 49) 加納猛：1983, スギのすべて, 全国改良普及協会, pp 629, 400 ~ 413
- 50) 加納猛：松枝信之, 鐫木自輔, 1959, 製材原木としてのスギ造林木の品質 (第一報), 林試研究報告, 112, 49 ~ 88
- 51) 川元紀雄：1993, 建築からみた木材コストの問題, 林業コスト問題の現状と展望, 森林総合研究所, 170 ~ 173
- 52) Kininmonth J. A. : Whitehouse L. J. edited: 1991, "Properties and uses of Radiata Pine, volume 1- Wood properties -", New Zealand Forest Service, pp216.
- 53) 菊池利喜夫：古越隆信：1976, スギの花粉飛散距離と受粉範囲, 日林講, 87, 179~180
- 54) 古賀信也：小田一幸：堤壽一：1990, スギ品種内の木材性質のバラツキ, 九大演報, 62, 101 ~ 113
- 55) 小泉章夫：上田恒司：1986A, 立木の曲げ試験による材質評価 (第1報) —樹幹曲げ剛性の測定—, 木材学会誌, 32 (9), 669 ~ 676
- 56) 小泉章夫：上田恒司：1986B, 立木の曲げ試験による材質評価 (第2報) —半径成長に伴う樹幹曲げ剛性の変動—, 木材学会誌, 32 (11), 860 ~ 867
- 57) 小泉章夫：高田克彦：上田恒司：1990, カラマツ精英樹の肥大成長と材質 (第2報) —18年生の子供家系の胸高直径と樹幹ヤング率—, 木材学会誌, 36 (9), 704 ~ 708
- 58) 小泉章夫：1988, 生立木の非破壊材質試験—樹幹ヤング係数を測定する—, 北方林業, 40 (1), 2 ~ 6
- 59) 久保隆文：伏谷賢美：蕪木自輔：1979, 樹幹量の異なったスギの年輪構造およびその形成, 農工大演報, 15, 81 ~ 87
- 60) 久保隆文：塩原豊：蕪木自輔：1983, 樹幹量の異なったスギの年輪構造およびその形成 (第4報) —木部形成活動の季節変化—, 農工大演報, 19, 21 ~ 26
- 61) 久保隆文：針葉樹の年輪構造とその形成に関する基礎研究, 1985, 農工大演報, 21, 1 ~ 70
- 62) 栗延晋：1987, 最小自乗推定値を用いた選抜指数による精英樹評価プログラム, 林木育種場研究報告, 5, 33 ~ 58
- 63) 栗延晋：1991A, 不連続片面ダイヤレル交配の最小自乗法による分散分析プログラム, 林木育種場研究報告, 9, 123 ~ 151
- 64) 栗延晋：1991B, 次代検定林における精英樹の材質について, 林木の育種, 161, 28 ~ 32
- 65) 栗延晋：金子富吉：新谷安則：大庭喜八郎：1984, 次代検定林間で共通に植栽されていない家系データを含めた地域区分の試み, 日林誌, 66 (3), 109 ~ 112
- 66) Libby W.J. : 1983, "The clonal option", Norwegian Forest Research Institute, As-NLH Norway, pp 32
- 67) 前田禎三：1983, スギのすべて, 全国林業改良普及協会, pp 629, 10 ~ 21

- 68) 松本昴：1956, たわみ振動による木材の動的弾性率の測定について, 岩大農報, 3, 46 ~ 61
- 69) 松本昴：1958, たわみ振動による木材の動的弾性率の測定について (第2報) 動的弾性率の含水率の影響ならびに静的弾性率との比較, 岩大農報, 4, 73 ~ 78
- 70) 松本昴：1959, たわみ振動による木材の動的弾性率の測定について (第4報) 動的弾性率の木理傾斜各 (繊維傾斜角) の影響, 岩大農報, 4, 253 ~ 258
- 71) 松本昴：1962, 木材の動的弾性係数 特にたわみ振動によるヤング率と対数減数率とに関する研究, 九大演報, 36, 1 ~ 86
- 72) 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—, 林木育種場研究報告, 6, 47 ~ 152
- 73) 見尾貞治：松本勉：堤壽一：1985, スギ品種の木材性質について—九州在来スギ6品種による予備実験—, 九大演報, 55, 187 ~ 199
- 74) 見尾貞治：長尾博文：堤壽一：1985, スギ造林木の材質特性—クモトオシとヤブクグリについて—, 九大演報, 55, 187 ~ 199
- 75) 宮島寛：1983, “スギのすべて”, 全国林業改良普及協会, pp 629, 133
- 76) 宮島寛：1985, 構造用材の強度性能評価方法, 木材学会誌, 31 (6), 429 ~ 434
- 77) 宮島寛：1992, “樹を育て 木をつかうために木材を知る本”, 北方林業会, pp 176, 162
- 78) 宮島寛：矢幡久：西林寺隆：1982, スギ幹材部における容積密度の品種間差異, 日林九支研論集, 35, 55 ~ 56
- 79) 宮島寛：矢幡久：古家宏俊：1983, スギ幹材部における容積密度の品種間差異 (Ⅱ), 日林九支研論集, 36, 111 ~ 112
- 80) Morgenstern E. K. : Teich A. M. : 1969, Phenotype stability of height growth of Jack pine provenance, Can. J. Genet., Vol. 11, 110 ~ 117
- 81) 中井孝：1986, 機械による等級区分, 木材工業, 41 (10), 455 ~ 459
- 82) Nakai Takashi: Tanaka Tashinari : 1989, Non-destructive testing Non-destructive testing by frequency of full size timber for grading, Building Research and Practice, 17(1), 23 ~ 29
- 83) 名波直道：中村昇：有馬孝禮：大熊幹章：1992, 応力波による立木の材質測定 (第2報) 立木への適用, 木材誌, 38 (8), 747 ~ 752
- 84) Nebgen R. J. : Lowe W. J. : 1982, Inheritance of growth branch angle and specific gravity in tree American Sycamore population: Silvae Genetica, 31(2-3), 86 ~ 89
- 85) Nicholls J. W. P. : 1967, Assessment of wood quality of tree breeding - IV. Pinus pinaster Ait. grown in western Australia, Silvae Genetica, 16, 21 ~ 28
- 86) Nicholls J. W. P. : 1971, The Environmental factors on wood characteristics - 2. Effect of thinning and fertilizer treatment on the wood of Pinus pinaster-, Silvae Genetica, 20(3), 27 ~ 73
- 87) Nicholls J. W. P. : 1971, The Environmental Factors Wood Characteristics -1. The Influence of irrigation on Pinus-, Silvae Genetica, 20(1-2), 26 ~ 33

- 88) Nicholls J. W. P., Morris J. D., Pederick L. A. : 1980, Heritability estimate of density characteristics in juvenile *Pinus radiata* wood, *Silvae Genetica*, 29(2), 54 ~ 61
- 89) 日本建築学会：1994, 木質構造設計基準, 同解説, 丸善, pp 342
- 90) 西村勝美：1983, “スギの全て”, 全国林業改良普及協会, pp 629, 421 ~ 422
- 91) 西村慶二：田島正啓：1993, 九州地域におけるスギ精英樹クローンの成育状況からみた育種区分, 日林誌, 75 (6), 493 ~ 500
- 92) 野堀嘉祐：1989, 材質育種における軟エックス線デンストメトリ法の利用—カラマツクローンにおける高容積密度要因の解析, “「樹木年輪が持つ情報」解析技術と林業への応用”, pp 141, 107 ~ 113
- 93) 農林水産省監修：1994, 針葉樹の構造用製材の日本農林規格並びに解説, 全国木材組合連合会, pp 88
- 94) 小田一幸：久田義則：堤壽一：1989, 同一林分で成育したスギ品種内の木材性質のバラツキ, 九大演報, 60, 69 ~ 81
- 95) 小田一幸：古賀信也：堤壽一：1988, 材質育種にむけてのスギ品種の年輪構造, 九大演報, 58, 109 ~ 122
- 96) 小田一幸：渡辺演一：堤壽一：1990, 構造部材を意識したスギ品種の木材性質, 九大演報, 62, 115 ~ 126
- 97) 大庭喜八郎：1978, プラス形質クローンの存在率とその安全混合数, 日林九州支論, 31, 77 ~ 78
- 98) 大庭喜八郎：1989, 育種戦略としての育種集団林, 林木の育種, 152, 20 ~ 24
- 99) Ohba K. : 1993, Clonal Forestry with Sugi(*Cryptomeria japonica*), "Clonal forestry II", Springer - Verlag Berlin Heidelberg, pp 240, 66 ~ 90
- 100) 大庭喜八郎：勝田柁編著：1991, “林木育種学”, 文永堂出版, pp 337, 98 ~ 106
- 101) 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, 九大演報, 45, 1 ~ 77
- 102) 太田貞明：1978, 軟エックス線デンストメータによる木材密度の測定, 木材工業, 125 (3), 27 ~ 29
- 103) 太田貞明：1989, アカマツ自然受粉家系の年輪構造及び収縮率の変異と遺伝率の推定, 林試研報, 355, 1 ~ 8
- 104) Polge H. : 1969, Further considerations about the X-ray and β -ray methods for determining wood density, The journal of the institute of wood science, Wood Science, No. 23 July, 39 ~ 44
- 105) Polge H. : Nicholls J. W. P. : 1972, Quantitative radiography and the densitometric analysis of wood, Wood Science, 5(1), 51 ~ 59
- 106) 林木育種センター：1992, 林木育種事業統計 (平成2年度版), pp 151, 86 ~ 89
- 107) 林木育種センター：1993, 内部事業資料
- 108) 林産行政研究会：1993, 木材需給と木材工業の現状 (平成4年度版), 林野庁, 325
- 109) 林野庁監修：1987, 林木育種事業30年の歩み, 林木育種協会, pp 208
- 110) 林野庁監修：1989, 林業統計要覧1989年版, 財団法人林野弘済会, pp 187
- 111) 林野庁監修：1989, 林業統計要覧, 林野弘済会, pp 187, 133
- 112) 林野庁監修：1989, 林業統計要覧, 林野弘済会, pp 187, 94
- 113) 林野庁：1996, 1992, 平成3年度精英樹の材質評価手法に関する調査報告書 (昭和63年度～平成3年度), 林野庁, pp 115, 33 ~ 65

- 114) 林野庁：1996, 林業の動向に関する年次報告, 林野庁, pp 260, 117
- 115) Rydelius J. A. and Libby W. J. : 1993, *Argument for Redwood Cloud Forestry, Cloud Forestry II*, Springer-Verlag, pp 240, 158 ~ 168
- 116) 澤田稔：1979, 木材の力学的材資質指標, 第29回日本木材学会大会特別講演要旨集, 1 ~ 13
- 117) 澤田稔：1985, 針葉樹構造材の材質評価について, 木材工業, 40 (2), 10 ~ 14
- 118) Sigh R. V. : 1978, Stem wood specific gravity from breast height specific gravity in Chile Pine, *Wood Science*, 11(1), 37 ~ 38
- 119) Snedeger G. W. : Cochran W. G. : 1967, “統計的方法第6版 (日本語版)”, 岩波書店, pp 546, 302 ~ 308
- 120) 祖父江信夫：1987, パソコンによる実大木材のヤング係数の自動計測, 木材工業, 42 (9), 21 ~ 23
- 121) 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
- 122) Sobue N. : 1990, Correlation factors of the resonance frequency for tapping and shear deformation of an alleging flexural vibration, *Mokuzai Gakkaishi*, 36(9), 760 ~ 764
- 123) 祖父江信夫：1993, シュミレーションによる繊維飽和点以上の木材における応力波伝播速度の検討, 木材誌, 39 (3), 271 ~ 276
- 124) Steinhoff R. J. : Hoff R. J. : 1971, Estimate of Heritability of Height Growth in Western White Pine Based on Parent-Progeny Relationship, *Silvae Genetica*, 20(5-6), 141 ~ 143
- 125) 須藤彰二：1994, “木材活用事典”, 産業調査会事典出版センター, pp 738, 615
- 126) 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, 木材誌, 38 (3), 222 ~ 227
- 127) 高田克彦：小泉章夫：上田恒司：1992, カラマツにおける肥大成長と材質の種子産地間差, 木材誌, 38 (12), 1082 ~ 1088
- 128) 高田克彦：1994, 樹幹ヤング係数によるカラマツ林木の評価, 北大演報, 51 (1), 115 ~ 166
- 129) 戸田良吉：1979, “今日の林木育種”, 日本農林出版, pp 231, 112 ~ 121
- 130) 外崎真理雄：岡野健：浅野猪久夫：1983, 縦振動およびたわみ振動によるシトカスプルーズの振動特性, 木材誌, 29 (9), 547 ~ 552
- 131) 堤壽一：1984, 木材性質ということ—その果たす役割—, 木材工業, 39 (5), 209 ~ 214
- 132) 堤壽一：1986, 木材性質とその意義—林業と木材工業の接点を求めて—, 木材工業, 41 (10), 460 ~ 465
- 133) 堤壽一：小田一幸：1989, 構造部材としての適応を指向させる木材性質—とくにスギ品種を中心に—, 材料, 38 (430), 14 ~ 20
- 134) USDA : 1972, "Wood handbook : Wood as engineering material", *Agriculture hand book*, 72, p.6-2 ~ p.6-5
- 135) 渡辺治人：堤壽一：小島敬吾：1963, 未成熟材に関する研究 (第一報) —スギ樹幹についての実験—, 木材誌, 9 (6), 225 ~ 230
- 136) 渡辺治人：堤壽一：松本勲：太田貞明：1964, 未成熟材に関する研究 (第二報), スギ樹幹内の比圧縮強度と比圧縮ヤング率の分布, 木材誌, 10 (4), 125 ~ 130

- 137) Write J. W. : 1976, Introduction to forest genetics, Academic Press, pp 463, 181 ~ 184
- 138) 矢幡久他 10 名 : 1987, 六演習林スギ試験地のスギ在来品種及び精英樹クローン間の材質変動, 九大演報, 57, 149 ~ 173
- 139) 山井良三郎 : 1983, “スギの全て (10 章 3 節)”, 全国改良普及協会, pp 629, 427 ~ 430
- 140) 依田恭二 : 1971, “森林の生態学”, 築地書館, pp 331, 104 ~ 106
- 141) Yoda Kyoji : Kira Tatu : Ogawa Husato : Hozumi Kazuo : 1963, Self-thinning in over crowded pure stand under cultivated and natural conditions - interspecific competition among higher plants XI -, Journal of Biology Osaka City University, 14, 107 ~ 129
- 142) Zobel B. J. : 1959, Core and juvenile wood of loblolly and slash pine trees., TAPPI, 42(5), 345 ~ 356
- 143) Zobel B. J. : 1961, Inheritance of wood Properties in conifers, Silvae Genetica, 10(3), 65 ~ 70
- 144) Zobel B. J. : 1964, Breeding of wood properties in forest trees, Unasylva, 18, 89 ~ 103
- 145) Zobel B. J. : 1970, Breeding to improve wood quality, Unasylva, 24(2-3), 32 ~ 36
- 146) Zobel B. J. : 1992, Wood variation its causes and control, Springer-Verlag, pp 363, 6 ~ 7
- 147) Zobel B. J. : 1993, Clonal forestry in the Eucalyptus, "Clonal Forestry II ", Springer - Verlag Berlin Heidelberg, pp 240, 139 ~ 148

Forest tree breeding systems for a forestry based on the concept of quality management considering the production of high level raw materials.

Yoshitake FUJISAWA*

1 Introduction

Japanese cedar (sugi : *Cryptomeria japonica* D. Don) is the most important coniferous species in Japan, and sugi plantation occupies about half of all artificial forests. Sugi wood is used for various purposes, especially as lumber for construction and in the making of traditional rice wine (Sake wine) barrels over the last several centuries. However, some properties of sugi wood are problematic, especially when used as a raw material or, recently, as mechanical lumber grades.

A large percentage of sugi lumber has a low value for the modulus of elasticity and is therefore given the lowest rank of "Machine Stress Rated Lumber" (MSR) in accordance with the "Japanese Agricultural Standard (JAS)". The use of sugi wood as a stress-free lumbars, therefore, has been limited. A large variation in wood properties has been recognized in the recent use of sugi. Our some previous reports have showed that wood properties vary more widely among either clone, or local cultivars, than within either a clone, or a local cultivar. A clone is consisted

with a single genotype and a local cultivar is consisted with a single genotype or few genotypes. In this study, it was assumed that genetic variation was a major factor affecting variation in the wood properties of sugi. In addition, it was hypothesized that these variations could be effectively reduced by classifying genotypes to a desirably narrow range, thereby improving wood by the selection of a genotype fitted to a specific end use.

In this study, two seedling test stands and six clone test stands were examined. Sugi is usually propagated with seedlings originally established in seed orchards using plus - tree clones or seed stands. On Kyushu, which is the Southwest main island of Japan, forestry has been managed with sugi cuttings for several hundred years and there are over a hundred characteristic local cultivars that originated as cuttings^(Ohba K. : 1993). Sugi plantations in Kyushu are mostly established with cuttings of local cultivars or plus-tree clones. We measured the dynamic modulus of elasticity (Ed) and wood density, which are key indicators for judging the mechanical properties of wood, and we discuss the effects of the "wood quality" improvement of sugi wood by breeding programs.

*) Forest Tree Breeding Center, Forest Agency MAFF JAPAN
3809-1, Ishi, Juo, Taga, Ibaraki 319-1301 Japan

MATERIALS AND METHOD

Materials

We compared eight forest stands. These were a 19-year-old test stand established with 14 open-pollinated families, a 17-year-old test stand established with 17 artificial mating families, and six test stands established with 12 common clones. An open-pollinated test stand and an artificial mating test stand located in the northern area of Ibaraki prefecture, which is about 100 km north of Tokyo, was also included in the same test design (three replicated random block design). The six test stands were established in Kusu (Oita prefecture), Nagasaki (Nagasaki prefecture), Kikuchi (Kumamoto prefecture), Yabe (Kumamoto prefecture), Kobayashi (Miyazaki prefecture), and Uchinoura (Kagoshima prefecture), in Kyushu. Each stand consisted of 12 common clones in a standard test design (three replicated complete randomized block designs) for a progeny test program in the Kyushu Breeding Region. The stands at the time of collection were 21 years old at Uchinoura, 23 years old at Kobayashi, 24 years old at Nagasaki, 25 years old at Kusu and Yabe, and 26 years old at Kikuchi, respectively. From these stands, we collected logs 1.5 m in length at 1m above the ground from sample trees. The location of each stand is shown by the blacked dots in Fig. 3-1.

The number of sample trees was between eight and sixteen per family on an open-pollinated test stand and from eight to twenty-four per family on an artificial-mating test stand. The overall sample number per stand was 151 on the open-pollinated test stand, and 242 on the artificial crossing test stand. In clone test

stands, the total number of samples for the clone test stand was 3 trees x 3 replications x 12 clones, giving 108 trees per stand. Hence, the overall samples size was 648 trees (108 trees x 6 stands).

Measuring Methods

We examined the modulus of elasticity, wood density, and diameter at breast height (DBH) for each sample tree. DBH was used as the indicator of radial growth. The modulus of elasticity is one of the most important indicator in judging the mechanical properties of sugi wood used as lumber in construction. This index for MSR Lumber was introduced to JAS in 1991. Wood density is also considered of key importance in forest product manufacture.

The modulus of elasticity was measured as the dynamic modulus of elasticity (Ed) on green-condition logs according to the tapping method^(Sobue N. : 1986). This method has the advantage of being easiest to use, and it is reasonably precise^(Sobue N. : 1989, Nakai T. and Tanaka T. : 1989). Details of the tapping method are outlined below, and an over view of the system is drawn in Fig. 3-3.

A sample log was placed on formed rubber pillows. Firstly, a microphone was placed at one end of a log to catch the sound produced by a tapping hammer at the other end of the log. This signal was then introduced to an FFT (Fast Fourier Transforms) spectrum analyzer (A & D: Type AD-3524 : with an accuracy of 14 bits), and the fundamental vibration frequency was measured. Secondly, the weight, log length, and diameters of both log ends were measured to calculate the wood density. Ed was obtained by the following formula.

$$Ed = 4f^2 l^2 r / n^2 g$$

where f is the fundamental vibration frequency (Hz), l is the length of the sample log(cm), r is the wood density of green sample log, n is the dimension of fundamental vibration frequency (in this experiment $n = 1$), and g is the gravitation (980 cm/sec²).

The wood density was measured according to a standard method. Namely, discs were collected at breast height from log specimens tested for Ed. These discs were cut into specimens with a radial dimension of 2.5 cm wide and a longitudinal dimension of 2 cm (see Fig. 3-4). Each specimen was split into smaller samples comprising several growth rings using a curved chisel conforming to the shape of growth rings (see Fig. 3-4). The volume of small samples was measured by replacing with cold water. Each was oven dried and weighted to an accuracy of 0.1mg. Wood density was obtained by the following formula.

$$\text{wood density} = \frac{\text{oven dry weight}}{\text{green condition volume}}$$

Because the Ed of logs obtained by the tapping method are regarded to be the weighted averages of the Ed of each growth ring in a log, a simulation of the Ed of the log variations of each age was made, using the Ed of a growth ring obtained by the vibration method. As discussed in a previous report^(Fujisawa Y. et. al. : 1992), the result was that the Ed of the logs was stable after the 10 - 15th ring from the pith, that is, the mature wood area. Therefore, it was recognized that Ed values of logs at each location become similar to the stem at a mature stage of development. The wood

density of the mature wood was also measured.

RESULTS AND DISCUSSION

Results of seedling test stands

The aim of this study was a relative comparison of the size of genetic gain between growth characteristics and wood properties on the same samples.

Range of mean values of open-pollinated families for Ed, wood density, and DBH are as follows. Family means for Ed from $41 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ to $57 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ with a coefficient variation (CV) among family means of 9%. Family means for wood density varied from 305 kg/m^3 to 336 kg/m^3 and CV among family means was 4%. Family means for DBH varied in the range from 13 cm to 16 cm with CV among family means of 7%. Ed and DBH showed the largest variation in family means and wood density showed the smallest. Family heritability based on open-pollinated families for each wood property was calculated according to following Formula. Family heritabilities were 29% for Ed, 14% for wood density and 0% for DBH.

$$h^2 = 4sf / (sf + sef + se)$$

h^2 : family heritability, sf : variance of families, se : variance of environment, sf : variance of a interaction between families and environment.

In comparison to the open-pollinated families, the range of mean values of artificial mating families for Ed, wood density and DBH are as follows. Family means for Ed varied from $34 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ to $57 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ with CV among family means of 13%. Family means for wood density varied from 284 kg/m^3 to 358 kg/m^3 with CV among family means of 5%. Family

means for DBH varied from 8cm to 15cm with CV among family means of 14%. Ed and DBH showed the largest variation in family means and wood density showed smallest least. The results of comparison among the ranges in family means of each wood property showed the same tendency for both open and artificially mating families.

Narrow-sense heritability based on the general combining ability for each wood property was calculated according to following Formula. Here,

$$h_a^2 = 4s_a / (s_a + s_{na} + s_{ef} + s_e)$$

h_a^2 : narrow-sense heritability, s_a : additive genetic variance, s_{na} : non-additive genetic variance, s_e : variance of environment, s_{ef} : variance of an interaction between families and environment.

general combining abilities are obtained from variances analysis for artificial mating families. Narrow-sense heritabilities were 14% for Ed, 7% for wood density, and 38% for DBH.

Percentage wood-quality improvements were defined as 2 times the CV for family heritability, on the assumption that both female, and males were selected within seed orchards in this study. There was no large difference in improvement among wood properties and DBH.

Figure 4-2 shows the percentage of general combining ability and specific combining ability in relation to total family variance for each wood property. Percentage for specific combining ability were high percentage for Ed and for wood density. Toda^(Toda R.: 1979) has suggested that the general combining ability is the best indicator of actual improvement value for a breeding program, if using the seed orchard option.

We are not be able to completely prevent a pollen contamination from un-selected trees on outer sides, of a seed orchard. We are not able to determine the variance between families with high percentage for a specific combining ability because sample numbers of a artificial mating family and crossings were not enough for an accurate analysis. If there were any cases of family variance with high specific combining ability percentages, the narrow-sense heritability calculated based on the results for open-pollinated families should be an over-estimate.

These results suggest that we need artificial mating or "byclonal seed orchards" between sets of selected parents to be sure of genetic gains for wood quality improvement in tree-breeding programs.

Results of clone test stands

Below are the ranges for clone means in Uchinoura, where the age of stand was 21 year old. The means for Ed, wood density, and DBH for the six clone test stands closest in age to two seedling test stands are as follows. The clone means for Ed varied from 38×10^3 kgf/cm² to 72×10^3 kgf/cm² with a CV among family means of 21%. The clone means for wood density varied from 303 kg/m³ to 360 kg/m³ with a CV among family means was 7%. The clone means for DBH varied from 13 cm to 20 cm with a CV among family means of 11%. Broad sense heritability for each wood property was calculated according to the following formula.

$$h_c^2 = s_c / (s_c + s_{ec} + s_e)$$

h_c^2 : broad sense heritability, s_c : variance of clones, s_{ec} : variance of the interaction between clones and environment, s_e : variance of

environment.

Those values were 86% for Ed, 51% for wood density and 44% for DBH. The corresponding percentage for wood quality improvement, which is defined as the multiplication CV by the broad sense heritability are shown in Fig. 5-1. The percentage for wood quality improvement for Ed (Fig. 5-1) showed the highest values and it was equal in grade up to the next higher grade of MSR Lumber of JAS.

Figure 5-2 shows the percentage of variance components for each wood property. Ed showed the largest variance between clones, and showed the smallest amount of error variance and interaction between clones and replication. Comparisons of variance components for genetic inheritance between the case of Ed for clones and the Ed for seedlings are shown in Fig. 5-3. While there were large difference in the conditions among the test stands, the Ed for clones showed the smallest variation for error and interaction.

Furthermore conventional analysis of variance for a completely randomized block design was done for the combined six stands. Variations in Ed are divided into each variance component of mean squares based on conventional analysis of variance. The results are shown in Fig. 8. The clone and stand component effects of Ed include 65% and 7% of the total variation, respectively (Fig. 6-1). The error variance component of Ed was only 28%. This was summed as the clone times the stand interaction, and the clone times the replication/stand interaction variance components divided to the error variance component. From these results, it seems that Ed is not influenced by stand environment.

Forestry based on quality control

The results of this study show that the clonal option has a greatest advantage, over the seed orchard option, in improving wood quality in sugi, not only because of the higher quality, but because of consistency in quality between lumber, which is critically important in wood products. In this stand, the Ed in sugi clones proved to be the most effective index for the wood quality of lumber for construction, both for the forestry producer and for wood products manufacturers. Specifically, the Ed of sugi clones showed highest heritability, the highest percentage for wood quality improvement and smallest variation among stands. The most important characteristics of clones is that they can hold both the additive and non additive genetic variation, and therefore we need not consider the specific combining ability. Fortunately, sugi is a species with the relatively high rooting ability, therefore sugi clones can be easily produced from cuttings.

The clonal option shows the merit of making equal wood and it also maintains the risk on the forestry management. The large ability of improvement by clonal selection requires a large population for clonal selection. The clonal option would also reduce risks with associated plans such as mosaic plantation^(Libby W. J. : 1983). Large populations for clonal selection would insure artificial mating of families among selected parents on the basis of specific combining abilities.

These results suggest that sugi silviculture, based on the concept of wood-quality management, may be realized by using Ed as an indicator in the grading of lumber for construction.

Conclusion

The results of this study can be summarized as follows.

1. Genetic gains and the effects of the decrease in the variations in wood properties on seedlings.

(1) Genetic gains for the dynamic modulus of elasticity (Ed) and the wood density were larger than the same values for the diameter of the breast height (DBH) on the basis of 17-year old open-pollinated families. Furthermore, genetic gains for Ed showed almost the same tendencies as that value for DBH on basis of 19 years old artificially crossed families. These results suggested that wood quality improvement by means of breeding programs would possibly have as effects as improvement by customary breeding programs based on the seed orchard option for growth traits such as DBH, height, volume and so on. However, genetic gains for wood properties were not significant enough in every case to satisfy needs of the current wood industry.

(2) For Ed and wood density, specific combining abilities made up a large percentage of the variance in families. These results suggested that special methods, including the biclinal seed orchard and artificial mating between selected parents with the special combining ability, are necessary to sure genetic gains for wood properties.

(3) In seedlings, the variance components of error and interactions between families and environments made up over eighty percent of the total variance of all properties. This indicates that large

variation in wood properties should not be decreased by breeding programs.

2. Genetic gains and the effects of the decrease in the variations in wood properties on clones.

(1) There were large variations in all characteristics of clones and the broad-sense heritabilities were large. Ed especially showed the largest broad-sense heritability and a large variation among clones. Therefore we expected to see the largest genetic gain for Ed. Furthermore, the clone maintained both the additive and non additive genetic variance, meaning that we did not need to employ special methods to ensure the genetic gain when using the clonal option.

(2) In clones, percentages of the variance components of error and interactions between clones and the environment to total variances were smaller than in the case of seedlings. In particularly, the summation of the error and interaction components of Ed were only fourteen percent. Therefore variation in Ed could be effectively decreased using a breeding program based on the clonal option.

(3) Cased on these results, the clonal option was superior to the seed orchard option for genetic gains and for decreasing variation.

3. Forestry based on the concept of the wood quality management.

(1) A broad sense heritability for Ed based on the results for combined six stands on Kyushu was 0.7, which was the same as those values calculated for each stand.

(2) A genetic gain based on former value of Ed was equal in grade up to the next higher grade of Machine Stress Rated (MSR) Lumber of the Japan

Agriculture Standard.

- (3) Both Ed and DBH were considered to be independent characteristics because there is no significant relation ship between the two characteristics. It therefore seems that both Ed and DBH are simultaneously improved by breeding programs based on the clonal option. DBH, however, showed a large variance component for the interaction between clones and stands.
- (4) Broad-sense heritabilities are regarded as equal to correlation coefficients between ortets and progenies, and the variance of the progeny is expected to accord to that value of ortets, for every characteristics in the case of clones. In particular, the Ed of clones showed the highest broad-sense heritability. Therefore we could presume that the Ed of the progenies, which

result to the properties of the produced lumber, based on the relationship between ortets and progeny.

- (5) The wood properties of clones showed the highest genetic gains, and variations in the wood properties of clones were smaller than for seedlings. These results suggest that forestry based on the concept of the quality management would be realized with the use of clonal breeding programs. On the other hand, clones are more susceptible to natural disasters than seedlings, and breeding programs for clones need effective selection populations to maintain their genetic diversity.

Therefore, a breeding system which combines the use of clones and seedlings appear to be the most effective for the forestry based on the concept of quality management.