

論文 (Original Article)

関東育種基本区から選抜されたスギ精英樹クローンの材質

平川 泰彦^{1)*}・藤澤 義武²⁾・中田 了五³⁾・山下 香菜¹⁾

Wood Properties of Sugi Clones Selected from Plus Trees in Kanto Breeding Region

HIRAKAWA Yasuhiko^{1)*}, FUJISAWA Yoshitake²⁾,
NAKADA Ryogo³⁾ and YAMASHITA Kana¹⁾

Abstract

Wood properties of plus tree clones (the clones totaled 563 and trees 1,060 respectively) of sugi (*Cryptomeria japonica*) which were thirty years old and planted in the Forest Tree Breeding Center at Mito city were investigated. The grafted or cutting clones were prepared from sugi plus trees which were selected all over Kanto Breeding Region (a part of Tohoku Region, Kanto Region, Koshin Region and Tokai Region). Annual ring width, latewood percentage, basic density, moisture content of green wood, heartwood percentage, heartwood color indexes, modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) in bending, tracheid length and microfibril (Mf) angle of S2 layer in tracheids were examined in samples removed from short length logs (50 cm in length) at 1.8 m height. Dynamic modulus of elasticity (Efr) was measured in first logs (1.8 m in length). The coefficient of variation among trees was large (over 30%) in heartwood moisture content, annual ring width (outerwood), latewood percentage (outerwood) and Mf angle (outerwood), rather large in log Efr (17.5%) and MOE of small clear samples in bending (25.6%), but small (under 15%) in basic density, heartwood percentage, heartwood color indexes and tracheid length. The variation of wood properties in sugi plus tree clones reported in this study should reflect the characteristics of young plantation-grown sugi trees in Japan. It is suggested that high moisture content in heartwood and low Efr of logs which are serious problems in utilization of thinnings can be improved by tree breeding.

Key words : Sugi tree, Wood property, Plus tree clone, Plantation-grown tree

要 旨

水戸市の旧林木育種センター育種素材保存園に植栽されていた約30年生のスギの精英樹クローン、563クローン1060個体を対象に基礎材質を調べた。供試木のクローンは、関東育種基本区（関東、甲信、東海地方及び福島県と岐阜県）に成育していた精英樹から接ぎ木または挿し木により育成されたものである。供試木の地上高約1.8 m部分から約50 cm長さの短尺丸太を採取し、年輪幅、晩材率、密度、生材含水率、心材率、心材色、無欠点小試験体の曲げヤング係数と曲げ強度、仮道管長および仮道管の二次壁中層のマイクロフィブリル傾角を調べた。また、地際から1.8 m長の丸太の動的ヤング係数を調べた。個体間の変動係数は、心材の生材含水率、外側10年輪の年輪幅、晩材率およびマイクロフィブリル傾角で30%以上と特に大きく、丸太の動的ヤング係数と小試験体の曲げヤング係数では17.5%と25.6%でやや大きく、密度、心材率、心材色及び仮道管長では15%以下と小さかった。本研究で示したスギ精英樹クローンの材質変動は、日本全国におけるスギの若齢造林木のそれをほぼ表しており、スギの間伐材の利用で問題になっている心材の高含水率や丸太の低ヤング係数に関しては、育種による改良効果が期待できるものと考えられる。

原稿受付：平成14年11月22日 Received Nov. 22, 2002 原稿受理：平成15年1月7日 Accepted Jan. 7, 2003

* 森林総合研究所 木材特性研究領域 〒305-8687 つくば市松の里1

Department of Wood Properties, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan;
e-mail : hirakawa@ffpri.affrc.go.jp

- 1) 森林総合研究所 木材特性研究領域 Department of Wood Properties, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)
- 2) 林木育種センター九州育種場 Forest Tree Breeding Center, Kyusyu Regional Breeding Office
- 3) 林木育種センター東北育種場 Forest Tree Breeding Center, Tohoku Regional Breeding Office

キーワード：スギ、材質、精英樹クローン、造林木

1. 緒言

近年、戦後の拡大造林で植栽されてきたスギの間伐材の利用促進が大きな問題となってきており、造林木の中小径間伐木の材質に関する情報の提供が求められている。全国のスギの基礎的な材質についての標準的な値やその変動の幅、さらには変動パターンなどを解明し、それに基つき各地域における品種等の造林木の材質特性を類別化できれば、スギの利用促進に資するばかりでなく、今後の造林木の選定にも役立つと考えられる。

そのような観点から、スギの若齢木の材質変動の実態を解明することを目的に、関東、甲信、東海地方等のスギ精英樹クローンを対象にそれらの基礎材質を調べた。研究対象としたスギは、林野庁の精英樹選抜育種事業で選定された精英樹のうち林木育種センター本所（旧関東林木育種場）が育成してきた563の精英樹クローン、1060個体である。これらの精英樹は関東育種基本区である関東地方（茨城、栃木、群馬、千葉、埼玉、東京、神奈川）、甲信地方（長野、山梨）、東海地方（静岡、愛知）及び福島県と岐阜県の13都県に育成していたものである。精英樹は、天然林および人工林で良好な成長を遂げた優勢木であることから、スギの材質変動や平均的な値などの材質の実態を把握するには適した材料であるものと考えられる。

2. 実験方法

供試木は、水戸市の旧林木育種センター育種素材保存園のスギ精英樹クローン集植所に育成していたスギである。集植所の番号は、11号、15号、16号および37号の4ヶ所で、設定時に1クローンにつき10個体が列状植栽され（3000本/ha）、サンプリング時には間伐等により個体が減り、約6～8個体が育成していた。

サンプリングは1991年から1994年までの間に行い、11号集植所（1964年設定、0.97 ha）の214クローン400個体、15号の151クローン277個体（1963年設定、0.49 ha）、16号の108クローン189本（1963年設定、0.49 ha）および37号の90クローン194個体（1966年設定、0.57 ha）の計563クローン、1060個体を伐採して供試木とした。各集植所のクローンは全て別個の精英樹から得られたもので、集植所間での重複はないように設定されていた。供試木は、挿し木または接ぎ木によって苗を増殖して2～3年後に植栽されたため、伐採時の樹齢は28～32年前後であった。全ての集植所において、1978～1979年にかけて、各クローンについて2～3本の間伐が行われた。

丸太ヤング係数測定用以外のサンプルは、地上高約1.8 mより上の部分から、約50 cm長の短尺丸太を1クローンにつき1～4個体、基本的には1クローンにつき2個体採

取した。多くの個体の樹形が不良であったり罹病しているような場合には1個体のみ採取した場合もあり、間伐事情などの理由によって伐採可能な場合には3～4個体採取したものもあるが、大部分のクローンでは1クローンにつき2個体のサンプル数を基本とした。また、丸太ヤング係数測定用としては、短尺丸太を採取した残りの下側の部分の丸太をサンプルとした。

各試験方法の概要は以下のとおりである。

（年輪幅と晩材率）：軟x線デンシトメトリー法によって測定した。繊維方向の厚さが5 mmのストリップを切り出し、気乾状態（温度20℃、相対湿度65%で平衡含水率が12%になるように調整）で軟x線で写真撮影し（16 kV、14 mA）、JOYCE製の濃度計で測定を行った。測定範囲は、髓から樹皮側の最も新しい年輪までである材などの欠点の少ない片側1方向である。晩材率は、0.55 g/cm³以上を晩材として計算した。

（容積密度）：接線方向の幅が約3 cm、繊維方向に約2～3 cm厚さのストリップを、まず生材状態で年輪界に沿って辺材、白線帯、心材に分割し、次に心材を3～5年輪が含まれるように、また辺材を2～3個に再分割し、生材重量を測定した。次に飽水状態にしてから浮力法で重量を測定し、最後に全乾で測定を行い、容積密度を算出した。値は、髓を含む2方向の平均値である。

（生材含水率）：容積密度の測定時に、同じ試料を用いて全乾法で測定した。値は、髓を含む2方向の平均値である。

（心材率）：髓を通る任意の直線上で直径と心材の幅を測定し、心材幅を直径で除して、100を乗じて求めた。

（心材色）：測定直前にディスクプレーナーでかながけしたサンプルについて、ミノルタの色彩色差計を用いスポット径8 mmでL*、a*およびb*値を気乾材の柁目面の心材部3ヶ所について測定し、平均値を求めた。

（丸太ヤング係数）：約1.8 m長の生材丸太の重量と容積を測定し、木口をハンマーで打撃して励振する縦振動法を行い、FFTアナライザで一次の固有振動数を測定し、動的ヤング係数を計算で求めた。丸太の動的ヤング係数（ E_{fr} ：GPa）を求める計算式は、 $E_{fr} = 4 \rho L^2 f^2 / 10^3$ 、 ρ ：密度（kg/m³）、L：材長（m）、f：一次の固有振動周波数（KHz）である。丸太の容積は、両端の周囲長から直径を算出して平均し、丸太断面積を計算で求めて、長さに乗じて計算で求めた。含水率の違いによる生材丸太のみかけの密度の違いは、丸太のヤング係数には大きく影響しないことが報告されている（中村ら、1991）。

（無欠点小試験体の強度性能）：JIS Z - 2101に従って、気乾状態で2 (R) × 2 (T) × 32 (L) cmのサンプルを作り、スパン28 cmの中央集中荷重で柁目方向から荷重をかけ、曲

げヤング係数と曲げ強度を測定した。木取りは、柵目板の髓側から順に外側へ3 cmごとに採材した。また、測定直前に重量を測定し気乾密度を求めた。測定時の含水率は、11～14%の範囲であった。

(仮道管長)：髓から2年輪目から2年輪ごとに晩材部をサンプリングし(1(R)×3～4(T)×15～20(L) mmの大きさ)、ジェフレ氏液で解繊後、万能投影機で長さを測定し、50本の平均値を求めた。

(ミクロフィブリル傾角)：髓から3、10および20年輪目の早材部(1年輪内を4等分した最も早くに形成された部分を目安とする)と晩材部(肉眼で晩材と認められる部分の年輪境界部を除く外側の部分を目安とする)の板目面切片を切り出し(厚さは早材で30～40 μm、晩材では10 μm以下)早材部の切片はヨウ素法でヨウ素結晶を析出させ顕微鏡写真の撮影(撮影倍率は160倍)を行い、プリント上(実質倍率は約400倍)で結晶の方向と仮道管長軸のなす角度をミクロフィブリル傾角(以後Mf傾角と略す)とみなして測定した。晩材部は、切片を写真撮影後、接線面の仮道管相互壁孔のスリット状の壁孔口と仮道管長軸のなす角度をMf傾角とみなしてプリント上で測定した。値は、早材と晩材ともに30本の仮道管の平均値を用いた。

上記の試験において、生材含水率や密度などについては、基本的に全てのサンプルについて測定を行ったが、ミクロフィブリル傾角や無欠点小試験体の曲げ強度性能等については、サンプル数が多く実験に時間がかかるため、サンプル数ある程度限定して測定を行った。以後の結果に関する記述および図の表示においてサンプル数が異なる場合があるのは主にそのためであるが、さらに節や欠点が含まれたサンプルは基本的に解析対象から除いたので、各試験項目ごとにサンプル数が異なる結果となっている。したがって、クローン数とサンプル数については、試験項目ごとに記載した。

また、材質に関する既往の報告では、いくつかの性質については未成熟材と成熟材とに区分されて分析されることが多い。しかし、同一個体内でも各性質間で境界が異なる場合があり、多くの個体の個々について境界を決定するのは難しいため、本研究では樹幹内を内側の10年と外側の10年に便宜的に区分し分析に用いた。明確な境界を決めていないので、本研究では前者を便宜的にコアウッド、後者をアウトウッドとよぶことにする。

さらに、単相関係数については、有意である場合のみについて、5%の危険率で有意な場合を(*)、1%の場合には(**)と表示した。

なお、これまでのスギの材質研究においては、多くの遺伝的に異なる個体を対象に分析した例は極めて少ないので、本研究ではできるだけ分析結果のデータを今後の研究に活用できるよう図を研究資料として別途公表することとした。結果の記載と関連する図の多くは、本号の研究資料に示した。

3. 結果と考察

3.1 年輪幅

140クローン(各クローン1個体、計140個体)のサンプルについて、デンシトメトリー法を用いて年輪幅と晩材率を測定した。

年輪幅の全年輪(25～30年輪)の140クローンにおける平均値は4.01 mmで、最大値は7.42 mm、最小値は1.82 mmであった(Table 1)。コアウッドの年輪幅の平均値は5.79 mmで、最大値は10.53 mm、最小値は2.52 mmであった。一方、樹齢約20～30年に形成された樹皮側から10年輪のアウトウッドの年輪幅の平均値は2.56 mmで、最大値は4.70 mm、最小値は0.52 mmであった。

Table 1. 年輪幅データ(140クローン)
Annual ring width data (140 clones).

	全年輪	コアウッド	アウトウッド
	Total	Corewood	Outerwood
平均(Av.mm)	4.01	5.79	2.56
標準偏差(S.d.) ¹⁾	0.930	1.518	0.906
変動係数(C.v.%) ²⁾	23.2	26.2	35.3
最大(Max.mm)	7.42	10.53	4.70
最小(Min.mm)	1.82	2.52	0.52
個体数(Tree num.)	140	140	140
クローン数(Clone num.)	140	140	140

1) Standard deviation. 2) Coefficient of variation.

コアウッドの10年輪の年輪幅の平均値とアウトウッドのそれとは正の相関が認められた($r=0.599^{**}$)。この結果は、初期成長の良好なクローンでは、少なくとも樹齢約30年あたりまで全体的にその傾向が続くことを示している。しかし、全体的には正の相関があっても初期成長に対する20～30年生時の成長量の値には幅があるので、実用的に用いる場合には注意が必要である。

3.2 晩材率

年輪幅と同じサンプルで晩材率の測定を行った。晩材区分の基準を気乾密度で0.55 (g/cm^3)以上とした場合、140クローンの晩材率の平均値は21.4%であった(Table 2)。また、年輪幅と同様にコアウッドとアウトウッドに分けた場合には、前者の平均値は20.3%で後者では22.2%であった(Table 2)。アウトウッドではやや晩材率がばらつき、値が大きい傾向があった。

年輪幅と晩材率との関係においては、全年輪の平均値で比べると両者に負の相関が認められ、相関係数は-0.400^{**}であった(Fig. 1)。しかし、樹幹の内側と外側とで比較すると、コアウッドでは有意な相関は認められず、アウトウッドでは1%のレベルで有意であった。年輪幅と晩材率との間に認められた負の相関は、成長が安定してくる髓からの年輪数が約20年より外側の樹幹で高くなる傾向があった。スギでは髓近くのコアウッド

Table 2. 晩材率データ (140クローン)
Latewood percentage data (140 clones).

	全年輪	コアウッド	アウターウッド
	Total	Corewood	Outerwood
平均(Av.%)	21.4	20.3	22.2
標準偏差(S.d.) ¹⁾	5.04	5.94	7.38
変動係数(C.v.%) ²⁾	23.6	29.2	33.2
最大(Max.%)	39.2	44.3	44.4
最小(Min.%)	10.3	8.7	9.2
個体数(Tree num.)	140	140	140
クローン数(Clone num.)	140	140	140

1) Standard deviation. 2) Coefficient of variation.

で密度が高い傾向があるが、コアウッドの密度は年輪幅の違いなどに影響されにくいものと考えられる。

既往の研究では、スギの年輪幅と晩材率との間には、一般に負の相関が認められているが、髓近くでは相関が低いのにに対して外側ではやや相関が高いことが報告されている(加納, 1960; 加納, 1961; 深沢, 1967; 見尾ら, 1985; 藤原ら, 1986)。しかし、個体が少数であったり単一品種だけを材料としたときには関係が認められない場合も多い(長尾ら, 1985)。

本研究では、コアウッドに比べてアウターウッドで年輪幅と晩材率の相関が高い傾向が認められた。既往の報告ともあわせて整理してみると、年輪幅と晩材率の間には全体的にみれば負の相関があるが、いわゆる未成熟材部分ではほとんど相関はなく、成熟材の部分で相関が高いものと推定される。しかし、両者の関係を散布図でみると円形に近い形をしており、年輪幅に対する晩材率の値の幅は大きいので、実用的に用いる場合には両者の関係にはあまり意味があるとはいえない。このことは、年輪幅の広いものでも晩材率を高くできる可能

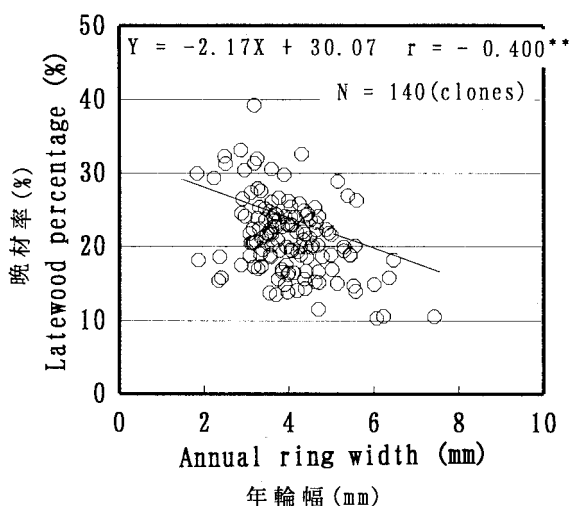


Fig. 1. 年輪幅と晩材率との関係
Relationship between annual ring width and latewood percentage.

性があり、育種によって両者をコントロールできる可能性があることを示している。

3.3 容積密度

生材の容積に対する全乾重量を示す容積密度に関しては、558クローン1050個体について測定を行い、辺材、心材および白線帯に分けて値を求め、前二者について解析を行った。辺材、心材および白線帯で分けたのは、測定を生材含水率と同時に行ったため、最初に辺材、心材および白線帯に試料を分割したことが主な理由である。

容積密度は、心材が辺材より高く、前者の平均値は0.322 (g/cm³)、後者は0.297 (g/cm³)であった (Table 3)。また、心材の容積密度は0.280以上~0.320 (g/cm³)未満、辺材では0.260以上~0.320 (g/cm³)未満の個体が多く、全体のほぼ6割から7割を占めていた (Fig. 2)。辺材では、0.200以上で0.240 (g/cm³)未満の値が20個体で認められたが、スギの平均からみればやや低すぎる値である。値が低い理由は明らかではない。

また、容積密度が心材で辺材より高い主な理由は、スギの未成熟材では一般に密度が高いことが関係していると考えられる。中小径木では心材の範囲も狭いので、心材に占める未成熟材の割合が大きくなり、心材密度が未成熟材の影響で大きくなるものと考えられる。心材成分の密度への影響としては、カラマツの心材におけるアラビノガラクトランの例がよく知られている(橋爪ら, 1974)。一般的な心材の抽出成分は密度への影響は小さいものと考えられており (Hillis, 1987)、スギでも特に大きな影響はないことが推定される。

年輪幅及び晩材率と容積密度との関係を、既述した140クローンについて調べてみると、年輪幅と容積密度(心材と辺材との平均値)との間には負の相関があり (Fig. 3) 相関係数は -0.453 **であった。また、晩材率と容積密度とは正の相関があり (Fig. 4) 相関係数は0.698 **であった。

樹幹をコアウッドとアウターウッドとに分けて、それぞれの年輪幅を心材と辺材の容積密度と比較すると、

Table 3. 容積密度データ (558クローン)
Basic density data (558 clones).

	心材容積密度	容積容積密度
	Heartwood density	Sapwood density
平均(Av.g/cm ³)	0.322	0.297
標準偏差(S.d.) ¹⁾	0.0339	0.0341
変動係数(C.v.%) ²⁾	10.5	11.5
最大(Max.g/cm ³)	0.467	0.510
最小(Min.g/cm ³)	0.243	0.200
個体数(Tree num.)	1050	1050
クローン数(Clone num.)	558	558

1) Standard deviation. 2) Coefficient of variation.

コアウッドに比べてアウターウッドの相関係数が大きく、アウターウッドで両者の相関が高い傾向が認められた。その理由は、既述したように年輪幅と晩材率の関係においては、コアウッドに比べてアウターウッドで高い相関を示しているため、アウターウッド側では、年輪幅と晩材率との相関が高くなり、そのために容積密度への影響が大きくなることが示唆される。したがって、幼齢時には年輪幅をコントロールしても密度を高くすることは難しいといえる。

既往の研究では、年輪幅と密度との関係について、相関がある場合（加納, 1960; 加納, 1961; 矢沢ら, 1957; 深沢, 1967; 見尾ら, 1985）とない場合（平井, 1951）とが報告され、小田らは品種による違いを報告している（小田ら, 1989）。スギでは多くの場合、未成熟材とそれより外側の成熟材部分とで区分した場合に、前者では相関がほとんどなく、後者では弱い負の相関関係があることが報告されている（加納, 1960; 加納, 1961; 矢沢ら, 1957; 深沢, 1967）。晩材率と密度には一般に正の相関があるので（藤原ら, 1986; 小田ら, 1988）既述したように晩材率と年輪幅との関係を反映した結果が、年輪幅と密度との関係にも現れていると考えられる。既往の報告による結果の不一致の多くについては、部位の違いなどの結果を反映したものと説明が可能であろうが、品種によってはやや特異な事例が認められており（小田ら, 1989）今後検討が必要である。

3.4 生材含水率

辺材含水率と心材含水率の518クローン945個体のデータをTable 4に示した。実際には1000個体以上の測定を行ったが、辺材含水率が140%未満の個体が認められ、何らかの要因で実際の含水率より低下してしまった可能性が考えられた。辺材の水分は、伐倒直後から蒸発、蒸散などで減少しやすく、さらには立木段階でも罹病や剥皮などの影響で減少することも多いことが考えられる。

辺材では細胞空隙が完全に水分で満たされた飽和状態を常に維持していると仮定すれば、空隙率から計算したスギの辺材含水率は、一般に100~300%程度となるものと推定される。辺材を実測した結果では、一般に飽和状態の90%以上であることが報告されており（藤原ら, 1988a; 三輪, 1991; 中田ら, 1998）辺材含水率が密度から予想される値より極端に低い場合には生材含水率測定用試料としては問題があると考えられる。そこで、本研究では、密度と空隙率から計算して大きく推定値からはずれることのない辺材含水率の最低値を約140%とし、それ以上の含水率であった945個体について解析を行った。

心材含水率は、80%以上~100%未満の個体が多かったが平均値は136.8%であった。また、最大値は283.9%で、最小値は41.0%であった（Table 4）。いくつかの工場では高含水率心材の目安となる心材含水率を150%以上として扱っている例があるが、150%以上の含水率の個体数は

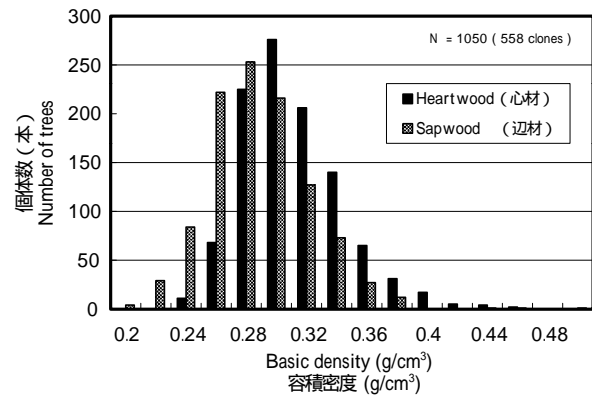


Fig. 2. 辺材と心材における容積密度のクローン間変動
Clonal variation of basic density in sapwood and heartwood.

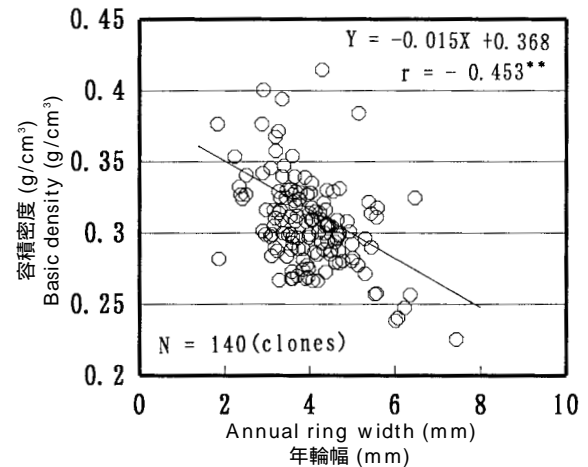


Fig. 3. 年輪幅と容積密度との関係
Relationship between annual ring width and basic density.

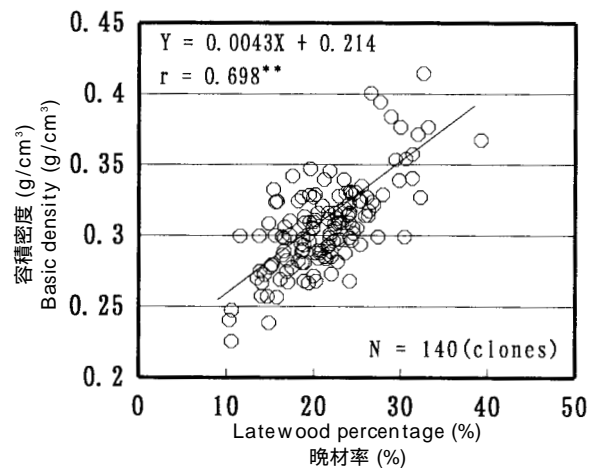


Fig. 4. 晩材率と容積密度との関係
Relationship between latewood percentage and basic density.

Table 4. 生材含水率 (518クローン) と心材率データ (211クローン)
Moisture content in green condition (518 clones) and heartwood percentage data (211 clones)

	生材含水率(M.C. in green wood)			心材率 Heartwood percentage
	心材 Heartwood	辺材 Sapwood	白線帯 Whitezone	
平均(Av.%)	136.8	230.2	80.6	60.4
標準偏差(S.d.) ¹⁾	47.51	40.89	21.14	8.32
変動係数(C.v.%) ²⁾	34.7	17.8	26.2	13.8
最大(Max.%)	283.9	351.0	249.9	76.0
最小(Min.%)	41.0	140.9	43.6	30.2
個体数(Tree num.)	945	945	929	393
クローン数(Clone num.)	518	518	511	211

1) Standard deviation. 2) Coefficient of variation.

352で、約37%であった。ただし、これらは伐倒直後の値であり、土場放置材では含水率の高い個体の数はこれよりやや減ることが予想される。

一方、辺材含水率は200%以上～260%未満の個体が多く、平均値は230.2%であった。最大値は、351.0%であった (Table 4)。辺材含水率と心材含水率との相関を調べた結果、正の相関が認められたものの ($r=0.220^{**}$)、散布図は円形に近いので実用的な意味はないと考えられる。

白線帯の生材含水率は、含水率が60%以上～80%未満の個体が多く、平均値は80.6%であった (Table 4)。白線帯の含水率は、40%以上～120%以内の範囲に99%の個体が含まれた。最大値が249.9%と、辺材と同じように高い場合もあったが、これはおそらくサンプリング時に白線帯と辺材との区別が難しかった結果、辺材が多く含まれてしまったためであろう。

3.5 心材率

心材率は、11号集植所の211クローン393個体について測定した。心材率は60%以上～70%未満の個体が多く、平均値は60.4%であった (Table 4)。心材率が30.2%～76.0%までとばらついているのは、直径成長と関係があると考えられる (矢沢, 1948; 井原, 1972; 藤原ら, 1988b)。直径と心材率との関係においては正の相関が認められ、相関係数は0.650^{**}であったが、直径が20 cm以上になると心材率はほぼ70～75%で一定となった。

一方、心材率と心材含水率とは、正の相関が認められたものの ($r=0.220^{**}$)、散布図では心材率に対する心材含水率の値の幅は大きく、実質的に意味はないと考えられる。相関が認められた原因のひとつとして、心材の外側で含水率が高いタイプのスギでは、径が大きくなるにしたがって含水率も高くなる (樹齢とともに高くなる) 傾向があるために (三輪, 1991) 径の大きい個体でやや含水率が高くなったことが考えられる。この結果は、河澄らが報告している (河澄ら, 1991a) ある林分では径の大きい個体ほど、心材含水率が高い傾向があることも関連

している可能性がある。

3.6 心材色

11号集植所の212クローン378個体について心材色を調べ、結果をTable 5に示した。心材色を測定したサンプルの生材状態での心材含水率の平均値は144.5%であった。明度を示すL*値は60以上～65未満の個体が最も多く、平均値は62.1であった (Table 5)。また、赤色と緑色を表す色指数のa*値の平均値は11.9、黄色と青色を表すb*値の平均値は20.0であった (Table 5)。

スギでは、心材色の明度値と心材含水率との間に負の相関があり、黒心では明度値が低く心材含水率が高いことが知られている (藤原ら, 1989; 河澄ら, 1991b; 平川, 1997; 林野庁, 1997)。精英樹クローンでも心材含水率と明度値とは負の相関が ($r = -0.585^{**}$) 認められた。

既述したように、工場の生産ラインで高含水率心材を人工乾燥のために選別するとき、境界となる心材含水率を仮に150%に設定した場合には、150%以下であれば明度値もほぼ60以上が多く、心材明度値の平均値以上で赤心に近いといえるであろう。一方、心材含水率が150%以上では、明度値が60以下の個体が多くなることから、

Table 5. 心材色データ (212クローン)
Heartwood color indexes data (212 clones).

	心材色 Heartwood color indexes		
	(L*)	(a*)	(b*)
平均(Av.)	62.1	11.9	20.0
標準偏差(S.d.) ¹⁾	5.46	1.66	1.73
変動係数(C.v.%) ²⁾	8.8	14.0	8.7
最大(Max.)	79.5	17.8	25.2
最小(Min.)	46.0	4.8	14.5
個体数(Tree num.)	378	378	378
クローン数(Clone num.)	212	212	212

1) Standard deviation.

黒心発生に注意する必要があると推定されているクローンもいくつか報告されている(平川, 1997)。また、色指数の a^* ($r = -0.400^{**}$) と b^* ($r = -0.201^{**}$) においても心材含水率と負の相関が認められたが、散布図は円形に近いので実用的な意味はないと考えられる。

3.7 丸太の動的ヤング係数

420クローン736本について丸太の動的ヤング係数を測定した。丸太の平均直径は23.3 cmで、丸太の動的ヤング係数の平均値は5.26 (GPa)であった (Table 6)。

既往のスギのデータと比べてみると、強度性能研究会による全国のスギの調査結果では(強度性能研究会, 1999)、6 (GPa) ~ 7.9 (GPa) の範囲をピークとして正規分布しており、本研究の値はやや低い傾向がある。その理由としては、1番丸太で根張りを含み2 m以下の試験体であること(強度性能研究会のデータベース用サンプルは一般に4 m材が多い) さらに樹齢が約30年生と比較的若いために未成熟材の割合が高いことが主な原因であると考えられる(飯島, 1988; 小泉, 1998)。これまでの研究では、根張り部分を含む1番丸太では、樹幹の中央部に比べて平均値で約10~20%以上低い場合があることが知られている。また、多くの間伐材について調べた中井らの結果と比較しても特にヤング係数が低いわけではないので(中井ら, 1984)、本研究での値がやや低いのはやはり若齢木であることの影響が大きいことが考えられる。

丸太の直径と丸太の動的ヤング係数との間には、負の相関が認められた ($r = -0.302^{**}$) (Fig. 5)。これは年輪幅と容積密度との間に負の関係が認められたことを反映していると考えられるが、相関係数は小さく、散布図も円形に近く実用的に用いるには問題があると考えられる。藤澤らは、単一のクローンでない限り精英樹クローンのヤング係数と胸高直径は独立した形質とみなされることを報告している(藤澤ら, 1992)。成長量よりも、別の要因のクローン間差の方がヤング係数のクローン間変動に影響が大きいことが推定され、後述するマイクロフィブリル

Table 6. 丸太の動的ヤング係数データ (420クローン)
Log's dynamic modulus of elasticity data (420 clones).

	丸太の動的 ヤング係数 Log's Efr (GPa)	丸太直径 Log's diameter (cm)
平均(Av.)	5.26	23.3
標準偏差(S.d.) ¹⁾	0.919	5.87
変動係数(C.v.%) ²⁾	17.5	25.2
最大(Max.)	8.47	40.3
最小(Min.)	2.07	8.8
個体数(Tree num.)	736	736
クローン数(Clone num.)	420	420

1) Standard deviation. 2) Coefficient of variation.

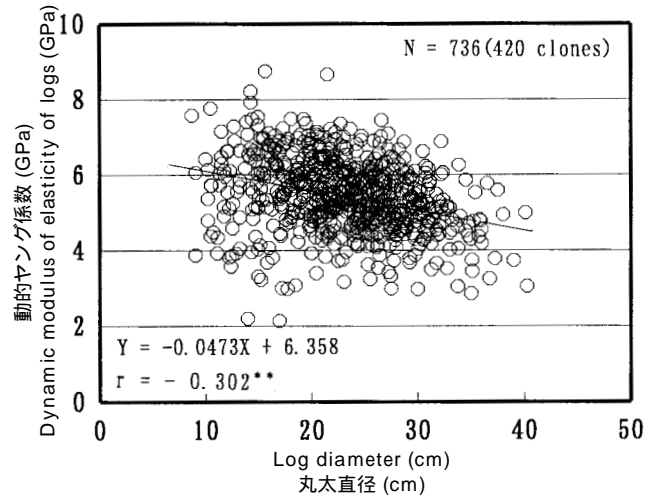


Fig. 5. 丸太直径と動的ヤング係数との関係
Relationship between log diameter and dynamic modulus of elasticity (Efr).

傾角も要因のひとつであることが考えられる。

3.8 曲げヤング係数と曲げ強度

11号集植所の214クローン392個体のサンプルから、2479本の無欠点小試験体を作製し、JIS規格による曲げ試験を行った。曲げヤング係数の平均値は5.57 (GPa) (Table 7)、最大値は9.81 (GPa)、最小値は1.94 (GPa)であった。

曲げ強度の平均値は56.2 (MPa)、最大値は89.3 (MPa)、最小値は20.2 (MPa)であった。

また、髓からほぼ順に木取りした曲げ試験用の無欠点小試験体の気乾密度は、0.249 ~ 0.511 (g/cm³)の間にあり、0.360以上 ~ 0.380未満 (g/cm³)のサンプル数が最も多く、平均値は0.358 (g/cm³)であった。

曲げヤング係数と曲げ強度との間には正の相関が認められ、相関係数は0.701^{**}であった。一方、サンプルの気乾密度と曲げヤング係数との間の相関は低かったが、曲げ強度との間にはそれよりやや高い正の相関が認められ、相関係数は0.477^{**}であった。

これらは、いわゆる未成熟材と成熟材とを含んだ値であるので、髓から20~30年輪に含まれる部分のアウトワードの1137サンプルについて調べた (Table 7)。曲げヤング係数の平均値は、6.56 (GPa)、曲げ強度の平均値は59.5 (MPa)であった。また、これらのサンプルの気乾密度の平均値は、0.347 (g/cm³)であった。これら3者間の相関係数も、コアウッドを含むサンプル群より大きく、密度と曲げヤング係数との間にもコアウッドに比べてやや高い相関が認められた。

しかし、樹幹の部位からみて成熟材とみなせるアウトワードの部分でもヤング係数と強度ともに低いクローンがいくつか認められた。この原因の一つとしては、単にアウトワードの強度性能が低くだけでなく、池田が指摘しているように、強度性能だけでみれば未成熟材範

Table 7. 曲げヤング係数、曲げ強度と気乾密度データ(214クローン)
MOE and MOR in bending, and air-dry density data (214 clones).

	全平均(Total Av.)			アウターウッド平均(Outerwood Av.)		
	曲げヤング係数	曲げ強度	白線帯	曲げヤング係数	曲げ強度	白線帯
	MOE (GPa)	MOR (MPa)	Density(air dry) (g/cm ³)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	Density(air dry) (g/cm ³)
平均(Av.)	5.57	56.2	0.358	6.56	59.5	0.347
標準偏差(S.d.) ¹⁾	1.43	9.48	0.040	1.09	9.26	0.037
変動係数(C.v.%) ²⁾	25.6	16.9	11.1	16.6	15.6	10.8
最大(Max.)	9.81	89.3	0.511	9.81	89.3	0.481
最小(Min.)	1.94	20.2	0.249	3.22	28.0	0.256
試験体数(Sample num.)	2479	2479	2479	1137	1137	1137
個体数(Tree num.)	392	392	392	392	392	392
クローン数(Clone num.)	214	214	214	214	214	214

1) Standard deviation. 2) Coefficient of variation.

困が20年輪以上のものがあることも考えられる(池田, 2001)。

年輪幅、密度、曲げヤング係数と曲げ強度等との関係においては、クローン間、さらにコアウッドとアウターウッドとの間でこれら相互の関係がやや異なることなどの結果が得られたが、既往の知見(佐々木ら, 1983; 藤田ら, 1983, 1985, 1988a, 1988b; 中井, 1984; 鈴木, 1991; 久保島ら, 2000; 中谷, 2000)と本研究の結果とに特に大きな違いは認められなかった。

3.9 仮道管長

仮道管長は、16号集植所の53クローン100個体を対象に2年輪ごとに測定した。形成初期の髄から2年輪目では平均値が1.42 mm、10年輪目では2.78 mmで、20年輪目では3.31 mm (Table 8)であった。個体間のばらつきを示す変動係数は、年輪間では特に変わらなかった。

2年輪目と20年輪目との仮道管長との間には正の相関が認められ($r=0.420^{**}$)、髄近くで仮道管長が長ければ20年輪目でも長い傾向があった。同様の結果は、小田らによっても報告されており(小田ら, 1992)、苗木や幼齢木の仮道管長は少なくとも20年生程度の若齢木の仮道管長を示す指標となりうることを意味している。しかし、散布図はやや円形に近く、実用的に使うには注意が必要である。

3.10 ミクロフィブリル(Mf)傾角

Mf傾角は、11号集植所の60クローン各1個体、計60個体を対象に、3、10および20年輪目の早材と晩材について測定を行った。

Mf傾角の平均値は、3年輪目の早材では31.2度、晩材では30.6度であり、晩材と早材の傾角に大きな違いはなかった(Table 9)。一方、10年輪目では、早材の平均値は18.8度、晩材では13.5度で(Table 9)、早材では18度以上で20度未満のクローン数が最も多く全体で見れば正規分

布していたのに対し、晩材では8度以上で10度未満のクローン数が最も多く、正規分布は示さず角度が小さい側に偏在していた(Fig. 6)。また、20年輪目においても、早材の平均値は13.4度、晩材では8.8度で、晩材のMf傾角が小さい傾向があった(Table 9)。

Mf傾角は髄から外側に漸減し、10~20年輪で一定値に達するが(藤崎, 1985; 平川ら, 1997)、10年輪目と20年輪目のMf傾角では、晩材が早材より小さい個体が多かった。その理由としては、早材よりも晩材の方が早くに一定値に達する傾向があるか、または早材の値が晩材ほど小さくならないことが考えられる。

3年輪目とほぼ成熟材と考えることができる20年輪目の晩材Mf傾角との間には正の相関($r=0.312^{*}$)があったが、散布図は円形に近く、3年輪目に対する20年輪目の傾角の幅が大きいので、苗木選抜指標などとして実的に使うにはやや問題があると考えられる。

また、各年輪ごとの晩材に対する早材の角度には、正の相関が認められた(Fig. 7)。晩材のMf傾角を基準とした早材のMf傾角の回帰直線の傾きを表すxの係数は、

Table 8. 晩材仮道管長データ(53クローン)
Latewood tracheid length data (53 clones).

	晩材 仮道管長		
	Latewood tracheid length		
	2年輪目	10年輪目	20年輪目
	Second ring	Tenth ring	Twentieth ring
平均(Av.mm)	1.42	2.78	3.31
標準偏差(S.d.) ¹⁾	0.132	0.229	0.271
変動係数(C.v.%) ²⁾	9.3	8.2	8.2
最大(Max.mm)	1.66	3.19	3.86
最小(Min.mm)	1.10	1.95	2.65
個体数(Tree num.)	100	100	100
クローン数(Clone num.)	53	53	53

1) Standard deviation. 2) Coefficient of variation.

Table 9. 早材と晩材仮道管におけるマイクロフィブリル傾角データ(60クローン)
Microfibril angles data of earlywood and latewood tracheids (60 clones).

	早材Mf傾角			晩材Mf傾角		
	Earlywood Mf angle			Latewood Mf angle		
	3年輪目	10年輪目	20年輪目	3年輪目	10年輪目	20年輪目
	3rd ring	10th ring	20th ring	3rd ring	10th ring	20th ring
	度(degree)			度(degree)		
平均(Av.)	31.2	18.8	13.4	30.6	13.5	8.8
標準偏差(S.d.) ¹⁾	3.34	5.13	6.46	5.40	5.03	3.59
変動係数(C.v.%) ²⁾	10.7	27.3	48.0	17.7	37.4	40.7
最大(Max.)	42.8	30.8	33.8	45.1	28.3	18.2
最小(Min.)	23.9	7.9	4.3	16.4	5.5	3.0
個体数(Tree num.)	60	60	60	60	60	60
クローン数(Clone num.)	60	60	60	60	60	60

1) Standard deviation. 2) Coefficient of variation.

20年輪目が最も1に近く、3年輪目と10年輪目とは約0.3であった。これは晩材と早材のMf傾角の関係がコアウッドとアウトウッドとで異なっていることを示しており、早材よりも晩材の方が早くに一定値に達する傾向があることと関連している可能性も考えられる。また、20年輪目においては、変動係数が晩材で40.7%、早材で48.0%と極めて大きく、よりクローン間差が大きく現れているものと考えられた (Table 9)。品種間と同様に (藤崎, 1985; 山下ら, 2000) Mf傾角のクローン間差も大きいことが明らかになったが、早・晩材の関係等の詳細についての説明は、今後の検討課題とした。

3.11 まとめ

約30年生のスギ精英樹クローンの基礎材質についての試験結果を示した。未成熟材と成熟材の区分法について

は、特に基準がないので髓から約10年輪と外側10年輪に分けて調べ、定義上の混乱を避けるため用語としてはコアウッドとアウトウッドを便宜的に用いた。本研究で区分したコアウッドの性質は、既往の報告で未成熟材といわれている性質とほぼ同じと考えて差し支えないだろうが、良く知られているように、各性質間、さらにはクローンごとにその範囲がいくらか異なっているものと考えられる。アウトウッドとした材の外側の部分でもいくつかのクローンでは未成熟材部を含んでいる可能性は否定できないが、多くのクローンを対象に調べたので、本研究で示したアウトウッドの性質がいわゆる成熟材のそれを表していると考えても特に問題はないであろう。多くのクローンでは10~20年輪の間に未成熟材と成熟材との境界部が含まれるであろうが、本研究では境

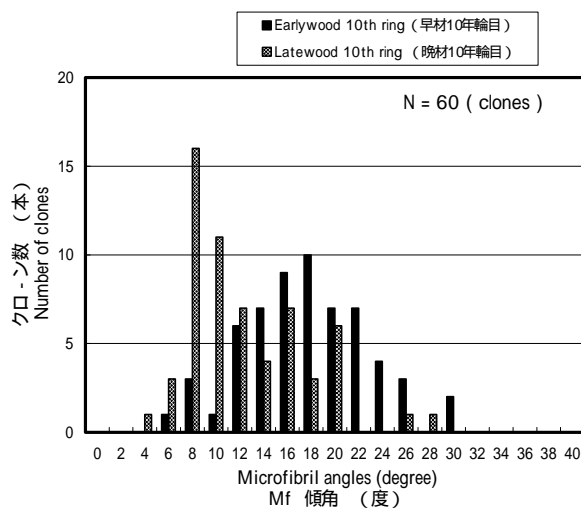


Fig. 6. 10年輪目における早材と晩材仮道管のMf傾角のクローン間変動
Clonal variation of earlywood and latewood tracheids microfibril angles in tenth ring.

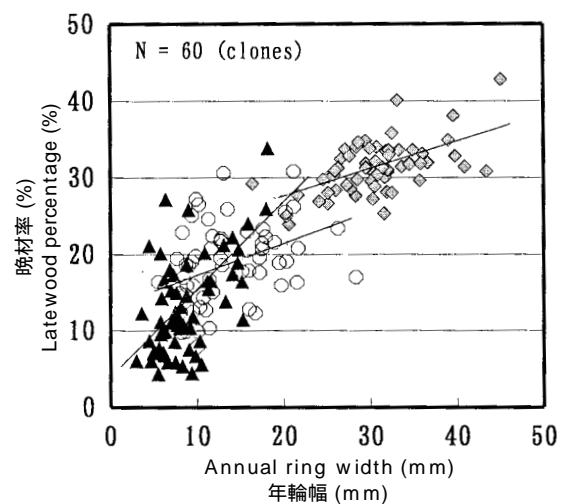


Fig. 7. 晩材仮道管と早材仮道管との間におけるMf傾角の関係
Microfibril angle relationship between latewood and earlywood tracheids.

Legend : 3rd ring $Y=0.353X+20.4$ $r=0.571^{**}$
10th ring $Y=0.328X+14.3$ $r=0.322^{*}$
20th ring $Y=0.983X+4.8$ $r=0.546^{**}$

界を明確に区分せずに、内側と外側に大別して評価を行った。

これまで、スギではいくつかの基礎材質において品種間差の大きいことが報告されてきたが、精英樹クローンにおいても品種間と同様のクローン間の基礎材質の違いが認められた。各性質の変動係数を比較すると (Table 1 ~ Table 9)、生材含水率の中でも心材の変動係数が大きく (34.7%)、容積密度は心・辺材ともに小さかった (心材: 10.5%、辺材: 11.5%)。藤澤は、スギの品種およびクローン間において、心材含水率及び丸太ヤング係数の変動係数が大きいので、育種による材質改良の可能性が高いこと、一方、密度の変動係数が小さいことを報告している (藤澤, 1998)。本研究でも同様の結果が得られたが、M f 傾角については髓から10年輪以降で変動係数の大きいこと (10年輪目; 早材: 27.3%、晩材: 37.4%、20年輪目; 早材: 48.0%、晩材: 40.7%) が明らかであった。密度の変動係数が小さく、M f 傾角のそれが大きいとの結果は、丸太ヤング係数の変動に影響の大きいことが指摘されている密度とM f 傾角の中で、これまで指摘されてきたようにクローン間差にはM f 傾角の影響がやや大きいことを裏付けているものと考えられる (平川ら, 1997)。また、M f 傾角だけでなく年輪幅および晩材率も外側の10年輪で特に変動係数が大きく、年輪幅と晩材率との相関係数は髓から20年輪を超えるあたりから大きくなっていく傾向が認められた。

本研究では、関東から甲信、東海及び東北地方の一部を含む13都県の広い範囲から選抜された多くのクローンを対象とすることにより、遺伝的な変異に富むサンプルを扱ったので、各性質の変動の幅や変動パターンの特徴、さらには各性質間の関係についての一般的な傾向をより明確に把握できたものと考えられる。育種による材質改良効果の可能性が特に大きい性質は、心材含水率及び丸太ヤング率に関わるM f 傾角が特に挙げられるであろう。また、各性質の値の変動の幅は、ここで引用した既往のスギの材質に関する文献等の知見を総合的に検討した結果と比べても大きく異なることはないので、これらは全国のスギの変動実態とほぼ一致するものと推定される。ここで示した各性質の平均値は、全国のスギの平均値とほぼ同じと考えても特に問題はないものと考えられる。

平成12年度の統計によれば、関東育種基本区では山行き苗木のうち、国有林では100%、民有林では95%が精英樹等から育成された育種種苗であることが報告されている (林木育種センター, 2002)。その点からみても、本研究の結果は、今後の造林木の品種選定や木材利用時の品質区分に必要なスギの材質に関する標準的データとして使うことが可能であり、重要な情報を提供するものである。

引用文献

飯島泰男 (1988) 構造用木材 - 強度データの収集と分析, 日本木材学会・木材強度・木質構造研究会編, 1-41

- 池田潔彦 (2001) 同一林分で生育したスギとヒノキの材質比較, 木材工業, 56, 365-371
- 井原直幸 (1972) 林木の心材の測樹学的研究, 九大農演報, 46, 1-122
- 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
- 小田一幸・久田義則・堤 壽一 (1989) 同一林分で生育したスギ品種内の木材性質のパラッキ, 九大演報, 60, 69-81
- 小田一幸・犬塚 良・堤 壽一 (1992) 林木育種にむけての材質指標因子としてのスギ仮道管長, 九大農学芸誌, 47, 51-55
- 加納 孟 (1960) スギの材質 (第1報) 釜淵産スギ, 林試研報, 125, 95-119
- 加納 孟 (1961) スギの材質 (第2報) 西川産スギ, 林試研報, 134, 115-139
- 河澄恭輔・小田一幸・堤 壽一 (1991a) 同一林分で生育したスギ品種の心材含水率, 九大農学芸誌, 46, 79-84
- 河澄恭輔・小田一幸・堤 壽一 (1991b) スギ心材の性質 - 生材含水率、温水抽出物および明度を中心に -, 九大演報, 64, 29-39
- 強度性能研究会 (1999) 強度データベース・データ集3, 森林総研, 66p.
- 久保島吉貴・大崎久司・沢田知世・折口和宏・吉原浩・岡野 健 (2000) 千葉県牛蒡沢スギの材質, 東大演報, 103, 243-306
- 小泉彰夫 (1998) 針葉樹造林木のヤング率の変異, 木材工業, 53, 206-211
- 佐々木光・角谷和男・瀧野真二郎 (1983) スギ36品種の力学的性質, 木材研究・資料, 17, 192-205
- 鈴木滋彦 (1991) 強度的特性 - 標準試験体 -, 木材の科学と利用技術・5. スギ, 日本木材学会研究分科会報告書, 68-74
- 中井 孝 (1984) 国産造林木の材質, 木材工業, 39, 42-46
- 中井 孝・田中俊成 (1984), 間伐材等小径木の強度性能, 木材工業, 39, 29-35
- 長尾博文・見尾貞治・堤 壽一 (1985) スギ造林木の木部形成パターンと年輪構造, 九大演報, 55, 201-211
- 中田了五・藤澤義武・平川泰彦・山下香菜 (1998) スギ生材含水率の個体内樹高方向での変化, 木材誌, 44, 395-402
- 中谷 浩 (2000) 富山県産スギの材質と強度, 富山県林業技術センター, 1-60
- 中村 昇・高岸 毅・名波直道・有馬孝禮・内迫貴幸 (1991) スギ丸太のヤング係数の地域差と丸太内部の変動, 木材工業, 46, 315-319
- 橋爪文夫・高橋成直 (1974) 日本カラマツにおけるアラビノガラクトンおよび抽出物の樹幹内変動, 信州大農演報, 11, 19-45
- 平井信二 (1951) 林木の重量生長に関する研究 (第3

- 報), 東大演報, 39, 219-234
- 平川泰彦 (1997) 黒心発生 の品種間差の解明, 農林水産会議事務局編, 品質管理型林業のためのスギ黒心対策技術の開発, 研究成果, 316, 67-73
- 平川泰彦・山下香菜・藤澤義武・中田了五 (1997) スギ丸太のヤング率の変動に関わる晩材仮道管S2層のミクロフィブリル傾角と密度の影響, 木材誌, 43, 717-724
- Hillis, W. E. (1987) Heartwood and tree exudates, Springer-Verlag, 268p.
- 深沢和三 (1967) スギ樹幹内の材質変動に関する研究, 岐阜大農演報, 25, 47-128
- 藤崎謙次郎 (1985) スギ品種における組織構造と材質との関係 () - クモトオシ、ヤイチ、ヤブクグリおよびメアサについて, 愛媛大農演報, 23, 47-58
- 藤澤義武・太田貞明・西村慶二・田島正啓 (1992) スギの材質と遺伝 - 精英樹クローンにおける丸太ヤング係数と直径成長のクローン間差と検定林間の相関関係 -, 木材誌, 38, 638-644
- 藤澤義武 (1998) 高度木材利用に適合する品質管理型木材生産への林木育種の対応に関する研究, 林木育種センター研究報告, 15, 31-107
- 藤田晋輔・池田俊士 (1983) 鹿児島大学農学部演習林に植林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との関係, 鹿児島大農演報, 12, 57-66
- 藤田晋輔・池田俊士 (1985) 鹿児島大学農学部演習林に植林されたスギ材の材質と利用 (第2報) - サツマメアサスギ材の機械的性質と比重との関係, 鹿児島大農演報, 13, 123-133
- 藤田晋輔・池田俊士 (1988a) 鹿児島大学農学部演習林に植林されたスギ材の材質と利用 (第3報) - クモトオシスギ材の機械的性質と比重との関係, 鹿児島大農演報, 16, 1-11
- 藤田晋輔・池田俊士 (1988b) 鹿児島大学農学部演習林に植林されたスギ材の材質と利用 (第4報) - ヨシノスギ材の機械的性質と比重との関係, 鹿児島大農演報, 16, 13-23
- 藤原新二・岩神正朗 (1986) 四国産スギ材の生長と材質 (第1報), 高知大農演報, 13, 43-52
- 藤原新二・岩神正朗 (1988a) スギおよびヒノキ材の生材含水率, 高知大学術研究報告, 37, 169-178
- 藤原新二・岩神正朗 (1988b) 四国産スギ材の生長と材質 (第4報) - 心材率及び辺材幅について -, 高知大農演報, 15, 17-27
- 藤原新二・岩神正朗 (1989) スギおよびヒノキ材の生材含水率と心材色の関係について, 高知大農演報, 16, 19-23
- 見尾貞治・松本 昂・堤 壽一 (1985) スギ品種の木材性質について, 九大演報, 55, 187-199
- 三輪雄四郎 (1991) 生材含水率、木材の科学と利用技術・5. スギ, 日本木材学会研究分科会報告書, 10-13
- 矢沢亀吉 (1948) 吉野及び鉢肥産スギの丸太直径と心材部直径並びに辺材率との関係, 日本林学会誌, 30, 14-19
- 矢沢亀吉・深沢和三 (1957) 中部地方における人工植栽スギ材の生長状況と理学的性質との関係, 岐阜大農演報, 8, 75-83
- 山下香菜・平川泰彦・藤澤義武・中田了五 (2000) スギ18品種の丸太ヤング率の品種間差に及ぼすミクロフィブリル傾角と密度の影響, 木材誌, 46, 510-522
- 林木育種センター編 (2002) 平成12年度林木育種事業統計, 林木育種センター, 113p.
- 林野庁編 (1997) スギ品種の材質特性の評価, 平成5~6年度林業試験研究報告書, 報告書36, 59-117