

大分県農林水産研究センター林業試験場研究報告, 第16号

品質管理型林業の実践に向けた
スギおよびヒノキの成長と木材性質に関する研究

津島俊治

A study on growth and wood properties of Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) and
Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) for the practice of the quality control type forestry.

S.TSUSHIMA

Bull. Oita Pref. For. Res. Ins., No.16

大分県農林水産研究センター林業試験場

〒877-1363 大分県日田市大字有田字佐寺原

平成18年3月

Oita Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Research Center, Forestry Research Institute.

Arita, Hita, Oita 877-1363, Japan

March, 2006

品質管理型林業の実践に向けた スギおよびヒノキの成長と木材性質に関する研究

津島 俊治

A study on growth and wood properties of Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) for the practice of the quality control type forestry

S.TSUSHIMA

要旨：

これまでスギ品種・クローンを対象に木材性質の樹幹内変動、林分内変動および林分間変動に関する研究が行われてきたが、従来の品種識別は針葉や樹幹等の形態的特徴に基づいていた。本研究は、DNA分子マーカーを用いて同定したスギ品種とヒノキクローンについて、それらの成長と木材性質へ及ぼす遺伝と森林施業の影響を検討したものである。

まず、あらかじめRAPD分析によって同定したヒノキ実生林とクローン林（ナンゴウヒ）を用いて、肥大成長と木材性質の林分内変動と林分間差を検討した。ナンゴウヒ林の胸高直径、容積密度、生材含水率、心材色、仮道管長、および力学的性質の林分内変動は実生林よりも小さかった。実生林に比べナンゴウヒ林は、晩材仮道管長が長く、その変動係数が小さく、丸太動的ヤング率の樹高方向変動が小さかった。したがって、木材性質の変動度合の点では、クローン林の優位性が明らかになった。

次に、MuPS分析によって同定されたスギ在来16品種では、それぞれ品種に特有な成長型を示し、心材含水率と心材の L^* 値、 a^* 値の品種内変動は小さく、品種間差が認められた。中生型および晩生型品種の容積密度は早生型品種に比べ高く、逆に動的ヤング率は低かった。丸太動的ヤング率の樹高方向変動と曲げ試験の荷重-たわみ線図に品種あるいは成長型の差異が認められた。

続いて、ヒノキ精英樹50クローンの木材性質の樹幹内変動とクローン間差を検討した。丸太動的ヤング率と容積密度の全クローン変動は比較的小さく、心材含水率も34%前後でクローン間の差がなかった。成長特性と木材性質の主成分分析では材質特性の寄与率が成長特性より高く、5つの優良グループに分類できることが明らかとなった。

さらに、3段階の密度水準で植栽されたスギ6品種（MuPS分析で同定）の成長と木材性質に及ぼす植栽密度の影響を検討した。植栽密度の高い試験区ほど肥大成長と材積成長が小さく、容積密度、心材 L^* 値、丸太動的ヤング率、縦圧縮強さ、曲げヤング率がわずかに高く、逆に生材含水率と心材 a^* 値が低かった。このことから、スギ材の物性値は、遺伝的要因に強く影響されるものの、植栽密度の影響もわずかに受けることが判明した。しかし、ヤブクグリだけは、他の5品種とは逆の傾向を示した。

おわりに、スギ在来品種3品種の丸太動的ヤング率に及ぼす林齢の影響を検討した。丸太動的ヤング率は、品種ごとにその値と樹高方向変動パターンが異なり、ヤブクグリとアヤスギでは林齢が高いほど大きく、オビアカでは林齢間に大差ないという品種間で林齢の影響が異なることが判明した。

Study on Growth and Wood Properties of Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) for the Practice of the Quality Control Type Forestry

S.TSUSHIMA

Summary

On the wood properties of sugi cutting cultivars and clones, the variation in the stem or forest and difference between forest were studied, but many studies used cultivars or clones which were identified based on morphological characteristic of the leaves and stem.

Therefore, this study clarified the effects of heredity and forest operations on growth and wood properties, used sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) cutting cultivars and hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) clones which were identified based on DNA markers.

1. Variations of Wood Properties in Forests of Seedling and Cutting Cultivars of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*)

Intra-forest variations of wood properties (radial growth, basic density, green moisture content, heartwood color, tracheid length, dynamic Young's modulus and mechanical properties) and the difference between that of seedling forests and cutting cultivars of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) were examined, using 60 trees of 3 seedling forests and 40 trees of 2 cutting cultivars Nangohi. The results are as follows.

1) Intra-forest variation of radial growth of Nangohi were smaller than that of seedling forests. 2) Intra-forest variations of basic density at breast height, green moisture content of sapwood, tracheid length and mechanical properties of cutting cultivars were significantly smaller than seedling forests, and green moisture content of heartwood, heartwood color and dynamic Young's modulus of logs were a little smaller. 3) Heartwood color and tracheid length at the breast height, and axial variation pattern of dynamic Young's modulus of logs were significantly different between seedling forests and cutting cultivars of Nangohi.

Thus, intra-forest variations of wood properties of cutting cultivars were significantly smaller than that of seedling.

2. Growth and Wood Properties of Sugi (*Cryptomeria japonica*) Cultivars Planted in the Kyushu Region

This study examined growth and wood properties of sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) cutting cultivars planted in the Kyushu region. Sixteen cultivars (48 trees) which were identified based on MuPS (Multiplex-PCR of SCAR markers) types were used.

Each cutting cultivar showed peculiar growth. The intra-cultivar variations in green moisture content of heartwood were small whereas the inter-cultivar variation was large. There were statistically differences in the L^* and a^* values of the heartwood color between cultivars, and a negative correlation of the L^* value with green moisture content was found. There was also

significant difference in wood density between cultivars, and the neutral and the late-growth type cultivars showed larger basic density than the precocious-growth type cultivars. A significant difference in dynamic Young's modulus was also found between cultivars, and there were two axial variation patterns. In one pattern the dynamic Young's modulus increased with stem height, and in the other it was almost constant except at the position of the butt log where it had the lowest value. The former was the neutral or late growth type and the latter was the precocious type. There was a significant difference in the bending load-deformation curve of clear test specimens between cultivars or growth types.

3. Wood properties of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) plus-tree clones

This study examined wood properties of 50 hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) plus-tree clones of Kyushu planted in same forest.

The intra-clone variations in dynamic Young's modulus of logs and basic density were relatively small, but it in green moisture content of heartwood weren't showed and all plus tree clones were approximately 34%. On the principle component analysis of growth and wood property factors, contribution ratio of wood properties were higher than that of growth properties. After try to select high quality plus-tree clone, 5 group were classified.

4. Effects of Initial Spacing on Growth and Wood Properties of Sugi (*Cryptomeria japonica*) Cutting Cultivars

To determine the effect of initial spacing on growth and wood properties of sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) cutting cultivars, six cutting cultivars (Iwao, Hinode, Yamaguchi, Yaichi, Shakain, Yabukuguri) which were identified based on MuPS (Multiplex PCR of SCAR) markers type planted at 1500, 3000, 5000 trees/ha were examined.

Effects of initial spacing on growth and wood properties studied were significantly smaller than that of cultivars. Diameter and volume growth in dense initial spacing were smaller than that in rare initial spacing. Wood density of mature wood, L^* of heartwood, dynamic Young's modulus of logs, compressive strength and modulus of elasticity in dense initial spacing were slightly higher, but green moisture content of heartwood and sapwood, a^* of heartwood were lower than that in rare initial spacing. The effect of initial spacing on mechanical properties was different between Yabukuguri and other 5 cultivars. Thus, wood properties of sugi were slightly influenced by initial spacing, although it was mainly influenced by inheriting factors such as cultivar.

5. Effects of tree age on dynamic Young's modulus of sugi (*Cryptomeria japonica*) cutting cultivars

To determine the effect of tree age on dynamic Young's modulus of sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) cutting cultivars, using 5 forests in 3 cultivars (Yabukuguri, Ayasugi, Obiaka) at the thinning and final cutting of the age.

Mean value and axial variation pattern of dynamic Young's modulus were significantly different between cultivars. Dynamic Young's modulus of Yabukuguri and Ayasugi increased with tree age, but it of Obiaka was not difference between tree age. Thus, effects of treet age on dynamic Young's modulus turned out to be different by cultivars.

目 次

第1章 緒 論	1
1.1 研究の目的	1
1.2 既往研究と研究概要	3
1.2.1 実生林とさし木林における木材性質の林分内変動に関する研究	3
1.2.2 スギ在来品種の成長と木材性質に関する研究	3
1.2.3 ヒノキ精英樹クローンの木材性質に関する研究	4
1.2.4 スギ品種の成長と木材性質に及ぼす植栽密度の影響に関する研究	4
1.2.5 スギ品種の成長と木材性質に及ぼす林齢の影響に関する研究	5
第2章 実生林とさし木林における木材性質の林分内変動	6
2.1 材料と方法	6
2.1.1 材料	6
2.1.2 試験方法	7
2.2 結果と考察	8
2.2.1 各林分のDNA分析結果	8
2.2.2 肥大成長のバラツキ	8
2.2.3 胸高部位における容積密度の林分内変動	8
2.2.4 胸高部位における生材含水率の林分内変動	9
2.2.5 心材色の林分内変動と林分間差	10
2.2.6 胸高部位における晩材仮道管長の林分内変動	10
2.2.7 動的ヤング率の林分内変動と樹高方向変動	11
2.2.8 気乾密度、曲げヤング率および曲げ強さの林分内変動と林分間差	12
2.3 結論	14
第3章 スギ在来品種の成長と木材性質	15
3.1 材料と方法	15
3.1.1 材料	15
3.1.2 試験方法	15
3.2 結果と考察	16
3.2.1 MuPS分析による品種同定	16
3.2.2 樹幹解析によるスギ品種の成長	17
3.2.3 心材、移行材および辺材の生材含水率	18
3.2.4 心材色と辺材色	18
3.2.5 各地上高ごとの容積密度	19
3.2.6 各品種の丸太動的ヤング率とその樹高方向変動	19
3.2.7 縦圧縮試験と曲げ試験で得られた力学的性質	21
3.3 結論	22
第4章 ヒノキ精英樹クローンの木材性質	23
4.1 材料と方法	23
4.1.1 材料	23
4.1.2 試験方法	23

4.2 結果と考察	24
4.2.1 丸太動的ヤング率の樹幹内変動	24
4.2.2 容積密度の樹幹内変動	25
4.2.3 生材含水率の樹幹内変動	28
4.2.4 材色の樹幹内変動	29
4.2.5 精英樹クローンの丸太動的ヤング率	30
4.2.6 精英樹クローンの容積密度	31
4.2.7 精英樹クローンが生材含水率	31
4.2.8 精英樹クローンの色	32
4.2.9 成長と木材性質のクローン偏差	32
4.2.10 主成分分析による優良クローンの検討	32
4.3 結論	36
第5章 スギ品種の成長と木材性質へ及ぼす植栽密度の影響	37
5.1 材料と方法	37
5.1.1 材料	37
5.1.2 試験方法	38
5.2 結果と考察	38
5.2.1 毎木調査と樹幹解析による成長特性	38
5.2.2 心材と辺材の生材含水率	43
5.2.3 丸太の生材密度	44
5.2.4 成熟材と未成熟材の容積密度	45
5.2.5 心材色の品種間差と植栽密度間差	47
5.2.6 丸太動的ヤング率の品種間差と植栽密度間差	47
5.2.7 縦圧縮試験と曲げ試験で得られた力学的性質	49
5.3 結論	53
第6章 スギ品種の木材性質へ及ぼす林齢の影響	55
6.1 材料と方法	55
6.1.1 材料	55
6.1.2 試験方法	56
6.2 結果と考察	56
6.2.1 林齢が異なるスギ品種の動的ヤング率	56
6.2.2 動的ヤング率の樹高方向変動への林齢の影響	58
6.3 結論	58
第7章 総合考察	60
謝辞	62
参考文献	63

第1章 緒 論

1.1 研究の目的

スギおよびヒノキは、わが国の最も有用な造林樹種である。それらの木材性質の樹幹内変動、林分内変動、林分間変動および種内変動を把握することは、品質管理型林業の実践に必要な生産管理や品質管理を行う上で極めて重要である。

木材性質の変動要因には、遺伝的要因と人為的な施業を含む立地・環境要因が挙げられる。立地・環境条件を育林過程で調節することは難しいが、同じ遺伝子型を持つ苗木を増殖・植栽し、遺伝要因の影響を排除することは可能である。つまり、クローン林における木材性質の変動は、実生林における変動に比べて小さいと推測される。

品種はその成立過程から地域品種と栽培品種の2つのグループに大別される（宮島；1989，白石；1991，小田；2000）¹⁻³⁾。前者は、天然に分布地域を拡大していく中での遺伝的分化によって成立した品種で、アキタスギ，ヨシノスギおよびヤクスギなどがある。これらの品種は遺伝的な変異を多く内在しているため、母樹の選び方によって子供群の特性は大きく変わる。後者は、人間の干渉により生じた品種であり、1) それまでの集団を人為的に淘汰し、変動幅の小さい集団にしたもの、2) 優良個体を選抜し、さし木のような栄養繁殖によって増殖したものに分けられる。栽培品種のほとんどは、2) に該当する。さらに2) の品種には2-a) 複数の個体からの複合クローンで構成されるもの、2-b) 1個体からの単一クローンで構成されるものがある。これらの栽培品種の中では、1) に属するものが最も大きな変異を保有しており、逆に、2-b) では遺伝的に全く均一な集団であるため、植栽場所の環境要因の影響を除けば、種々の特性における変動幅は極めて小さいと考えられる。

さて、九州においては古くから多数のスギ在来品種が成立しているが、これらの中には異名同品種や同名異品種が存在し、また成育環境や樹齢の違いにより針葉や樹幹の形態が変化することから、正確なさし木品種の同定は困難とされてきた（宮島；1989，白石；1991，小田；2000）¹⁻³⁾。そのため、苗木生産から植栽に至る段階で品種名を間違えるなどいわゆる善意の過失を犯してしまう可能性がある。実際に、在来品種が精英樹として選抜され、九州産スギ精英樹クローンの中には同じDNA型を示すものが約1/3も存在する（高田ら；1995，久枝ら；2000）^{4,5)}。

ところで、林業現場で植栽されるスギ品種は時代とともに変化している。大分県の例では昭和50年頃までヤブクグリやアヤスギが中心であったが、その後は多品種趣向へと変わり、最近はやまがし、ヤマグチ、オビスギおよびアヤスギの4品種がスギ造林面積の約70%を占めている（大分県森林保全課資料）。このように植栽品種が変化した理由は、森林所有者の森林造成や木材利用に対する期待が反映されたためと考えられる。たとえば、木材利用では、今後のスギ材利用を進めるうえで優位とされる品種、すなわち建築用構造材や集成材に適した強度性能の優れた品種が求められているからであろう。

しかしながら、木材利用の多様化や高度化が進む中、スギ材は用途への適合性という点で多くの課題を抱えている（堤；1982，同左；1984，同左；1992，同左；1995）⁶⁻⁹⁾。すなわち、スギには多数の栽培品種や地域品種が存在し、それらの材質が品種・クローンや地域等によって大きく異なることである。多様で高度な品質要求に応えた木材生産と木材利用を進めていくには、今後とも多くの栽培品種および地域品種を対象とした材質変動の把握とその原因を解明していく必要がある。とくに、古くから多数のさし木品種が成立している九州地方では、スギの材質管理を推進するにあたって品種の存在を無視することはできない。

一方、ヒノキ材は、土台、柱などの一般建築用材や撫育管理された無節柱材として根強い需要をもっているが、将来的には構造用や内装用の板材あるいは集成材用ラミナ等といったニーズが多様化することも予想される。しかし、林業生産現場においてはそれに対応したヒノキ材生産が行われているとは言い難く、現状では木材性質の変動が大きいと推測される実生苗を用いた林業が展開されている。

そうした中、近年、小型さし穂を用いたヒノキ育苗技術が向上し、比較的容易でしかも大量にさし木苗生産が可能となった（塩川；1986，諫本；1998）^{10,11)} ことから、九州のスギ林業に見られるようなさし木苗を用いたヒノキ林業も期待される。ヒノキの育種において、これまでは成長量、根曲り、幹曲り、枝特性といった生産サイドの指標や丸太の外観的形質を重視してきたが、今後は強度、材色、加工性といった木材利用に適した遺伝的特性を加味した選抜・増殖が必要と考えられる。

さらに、林木の成長や材質のコントロールを目的に林業技術として適用される森林施業、すなわち植栽方法や保育方法等が木材性質に影響を及ぼす可能性がある。今後、品種・クローン等の遺伝性に起因する木材性質はもちろんのこと、森林施業が木材性質に及ぼす影響も明らかにし、それらの情報を育種あるいは林業生産現場へフィードバックしていくことが重要である（図-1）。

以上のように、スギおよびヒノキの品質管理型林業の実践に向けて、それらの成長と木材性質の樹幹内変動、林分内変動、林分間変動および種内変動を把握するとともに、それらの木材性質に影響する要因との関係を明らかにすることを本研究の目的とする。

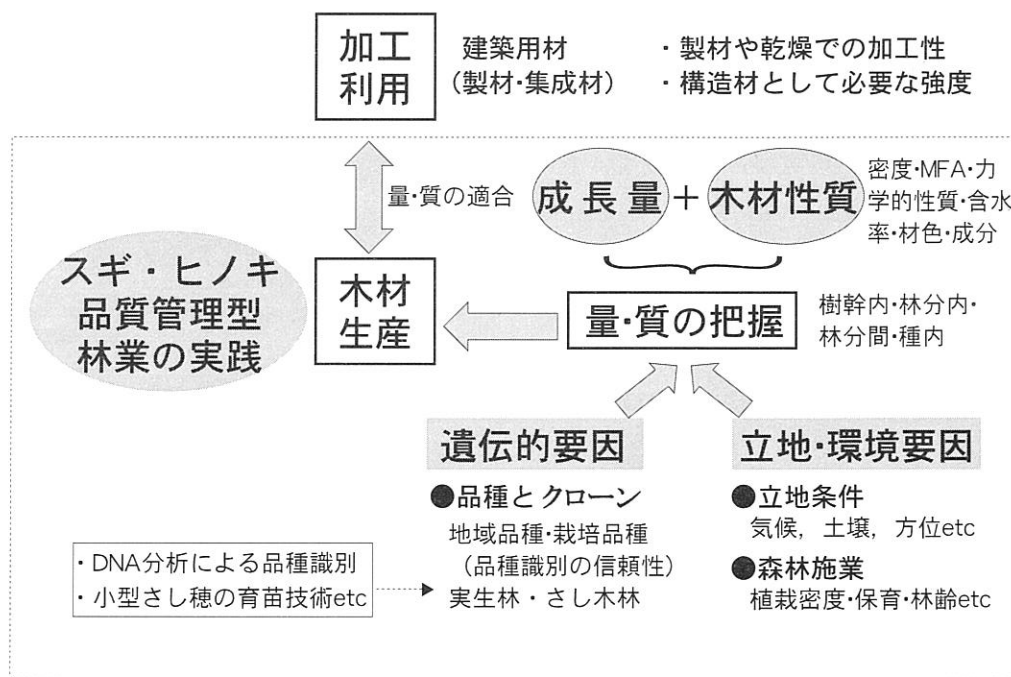


図-1 研究目的のイメージ図

1.2 既往研究と研究概要

1.2.1 実生林とさし木林における木材性質の林分内変動に関する研究

これまでのヒノキの木材性質に関する研究は、主に実生ヒノキを対象としたもの（池田ら；1994，同左；2000，池田；2001，池淵；2000，岩崎；2002，太田；1972，大塚；1993，大森；1993，古賀ら；1990，同左；1992，藤原ら；1988，湊ら；1989）¹²⁻²³⁾であり、これらの研究の中でも木材性質の林分内変動に関するものは僅かである。20年生および25年生のヒノキ実生林における木材性質の林分内変動に関する古賀ら（1992）²¹⁾の研究では、容積密度の変動係数が約7%，仮道管長の変動係数が約6-8%，縦圧縮強さが9%，縦圧縮ヤング率が約26%であると報告されている。また、池田ら（2000）¹³⁾の研究ではヒノキ林分内の立木応力波伝播速度の変動係数が19年生林分で3.2%，45年生および70年生林分で5.0-5.9%であると報告されている。一方、ヒノキのクローン林を対象とした研究事例は少なく（津島ら；2004，同左；2005，同左；2006）²⁴⁻²⁶⁾、ヒノキのクローン林における木材性質およびその林分内変動に関する知見は今の段階ではほとんど得られていない。

そこで、大分県下の実生ヒノキ3林分とさし木のナンゴウヒ2林分を対象として、あらかじめ実生林であるかクローン林であるかを確認するためRAPD分析を行い、その後、成長量ならびに丸太の動的ヤング率、胸高部位の生材含水率、容積密度、心材色、仮道管長、曲げヤング率および曲げ強さを測定し、実生林とさし木林における木材性質の林分内変動について検討した（津島ら；2005，同左；2006）^{25,26)}。

1.2.2 スギ在来品種の成長と木材性質に関する研究

スギ在来品種の識別は、これまで主に針葉や樹幹等の形態的特徴に基づいていた（宮島；1989，白石；1991，小田；2000）¹⁻³⁾が、近年、染色体の核型分析やアイソザイムによる品種識別の研究が進み（宮崎ら；1981，佐藤ら；1984）^{27,28)}、最近ではDNA分子マーカーを用いた識別法が開発され（高田ら；1996，久枝ら；1999，同左；2000，同左；2003）²⁹⁻³²⁾、比較的簡便な品種同定が可能となってきた。これまでスギの品種あるいはクローンの木材性質に関して多くの研究が行われている（諫本ら；1998，小田ら；1988，同左；1989，同左；1990，小野；1988，亀井ら；1988，河澄ら；1991a，同左；1991b，小泉ら；1997，古賀ら；1990，佐々木ら；1983，朱ら；2003，津島；1988，津島ら；1989a，同左；1989b，長尾ら；1985，中田ら；1998，平川ら；2003，藤崎ら；1986，藤澤ら；1992，同左；1993，同左；1995a，同左；1995b，見尾ら；1985，三輪；1983，森川ら；1996，矢幡ら；1987，山下ら；1995，林野庁；1997，Wangら；1992，同左；1996）³³⁻⁶¹⁾が、それらの多くが従来の特徴によって識別された品種名に基づくもので、DNA鑑定により正確に品種同定された個体を対象にしたものはほとんどない（津島ら；2005a，同左；2005b，同左；2006）⁶²⁻⁶⁴⁾ことから、スギ在来品種のそれぞれの品種本来の材質特性を示していないことも推測される。

そこで、大分県湯布院町の西日本主要スギ品種展示林に植栽されている27品種の内、あらかじめ久枝ら（2003）³²⁾のMuPS型データベースと照合し同定された九州産16品種（イワオ，ナカムラ，ヒノデ，タケノサコ，ヤマグチ，クモトオシ，ヤイチ，ガリン，エダナガ，オオノ，アカバ，オビアカ，ヤブクグリ，メアサ，アヤスギ，ホンスギ）を対象として、スギ在来品種の成長量ならびに丸太の動的ヤング率、生材含水率、材色、容積密度および力学的性質を測定し、各木材性質の品種間差および樹幹内変動について検討した（津島ら；2005a）⁶²⁾。

1.2.3 ヒノキ精英樹クローンの木材性質に関する研究

ヒノキの木材性質に関する研究は、主に実生ヒノキを対象としたものが多く（池田ら；2000，池田；2001，池淵；2000，太田；1972，大塚；1993，大森；1993，古賀ら；1990，同左；1992，藤原ら；1988，湊ら；1989）¹²⁻²¹，クローンヒノキを対象とした報告は少ない（池田ら；1994，岩崎；2002，津島ら；2004，同左；2005）²²⁻²⁶。精英樹8家系と実生1系統を対象とした池田ら（1994）²²の報告では、円盤と丸太の材質は家系間と検定林間で有意差が認められたが、正角の材質の差は家系間よりも検定林間で大きく現れるとしている。一方、精英樹23家系を対象とした岩崎（2002）²³の報告では、丸太の動的ヤング率は環境の違いによる影響が小さく、家系の違いによる影響が大きいとしている。この両者の報告ではやや異なる結果が得られたことから考えて、ヒノキの木材性質へ及ぼす遺伝性の影響がスギほど強くなく、環境の影響を受けやすいことも予想される。

そこで、大分県天瀬町のヒノキ精英樹クローン集植所に植栽されている九州産ヒノキ精英樹50クローン（大分4，大分5，大分7，大分8，三重5，三重6，竹田7，竹田8，玖珠5，玖珠6，日出4，日出6，国東18，国東19，佐伯5，佐伯17，中津9，中津12，嘉穂5，嘉穂6，浮羽14，甘木2，筑紫5，山田2，藤津8，諫早1，諫早3，神崎1，長崎1，長崎署1，唐津1，佐賀1，北諸県1，菊池1，小城1，阿蘇3，阿蘇4，阿蘇6，阿蘇7，西臼杵1，東臼杵1，南高来3，南高来8，始良4，始良5，始良11，始良12，始良39，始良47，始良53）を対象として、胸高直径ならびに丸太の動的ヤング率，容積密度，生材含水率および材色の樹幹内変動とクローン間差について検討した（津島ら；2004）²⁴。

1.2.4 スギ品種の成長と木材性質に及ぼす植栽密度の影響に関する研究

林木の成長や材質のコントロールを目的に林業技術として適用される森林施業，すなわち植栽方法や保育方法等が木材性質に影響を及ぼす可能性は十分予測される。国外では，種々の造林樹種を対象に研究がなされており，材質指標，樹種，植栽密度，間伐や枝打ちの実施林齢・回数・強度等によって成長や材質への影響が異なると報告されている（Zobelら；1989）⁶⁵。しかし，国内のスギについては，植栽密度の影響をはじめ，間伐や枝打ちの材質への影響に関しても（岩神ら；1986，大塚ら；1988，古賀ら；2000，永井ら；1997）⁶⁷⁻⁶⁹，必ずしも十分な知見が得られているとは言い難い。とくに，植栽密度が木材性質に及ぼす影響に関する報告は少ない（津島ら；2005b，同左；2006，藤澤ら；1995，Wangら；1992，同左；1996）^{63,64,55,70,71}。藤澤ら（1995）⁵⁵は，植栽密度を高くすることによって，年輪幅が減少し，平均密度が増大するが，晩材幅や晩材密度に顕著な変化はなかったと報告している。また，Wangら（1992，1996）^{70,71}は，10000本/ha，2500本/ha，1110本/ha，630本/ha，400本/haの5つの植栽密度で植栽された台湾産スギ材の木材性質に関する研究で，仮道管伸長率への植栽密度の影響は認められず，植栽密度2500本/haが長い仮道管，狭い年輪管，高い晩材率および低い心材率であり，密度，動弾性率，曲げ弾性率および曲げ破壊係数では10000本/haと400本/haの間に顕著な差が認められたが，ほかの植栽密度間に顕著な差は認められなかったと報告している。

そこで，大分県九重町の地藏原スギ品種別・植栽密度別試験林に1500本/ha，3000本/ha，5000本/haの3段階の異なる密度で植栽された10品種を対象として，スギ品種の成長と木材性質に及ぼす森林施業の影響について検討した。第2章のスギ品種に関する研究を行う際に品種同定の必要性を認めたことから，同様に久枝ら³²のMuPS型データベースと照合し同定された6品種（イワオ，ヒノデ，ヤマグチ，ヤイチ，シャカイン，ヤブクグリ）を用いて，成長量ならびに生材含水率，材色，容積密度，丸太の動的ヤング率および力学的性質を測定し，品種間差，植栽密度間差および樹幹内変動を検討した（津島ら；

2005b, 同左; 2006)^{63,64)}。

1.2.5 スギ品種の成長と木材性質に及ぼす林齢の影響に関する研究

木材利用の実際においては、若齢の間伐材から高齢の主伐材まで様々な樹齢や径級の丸太が供給される。これらの丸太の木材性質に及ぼす森林施業や成長経過に関して、とくに木材性質の品種特性が顕著とされるスギの成長経過に関連づけた研究は少ない（諫本ら；1998，小泉ら；1997，津島ら；1989b，朱ら；2003，中谷；1991)^{33,41,44,47,81)}。津島ら(1989)は、59年生のヤブクグリ主伐木の木材性質の樹幹内変動を検討し、丸太番号間の強度差が大きい理由を容積密度数，晩材仮道管長および曲げ強度の樹高方向変動および放射方向変動が大きいためと報告している。また，小泉ら(1997)は、54年生以上の秋田スギ19林分から得た丸太動的ヤング率の林分間差と個体間差は大きく，地域間差は明らかでなかったと報告している。

そこで，大分県下の間伐期と主伐期にあたるヤブクグリ，アヤスギおよびオビアカのスギ3品種5林分を対象とし，木材性質（丸太動的ヤング率）の林齢間変動について検討した。

第2章 実生林とさし木林における木材性質の林分内変動

本章では、実生ヒノキ3林分とさし木のナンゴウヒ2林分を対象として、あらかじめ実生林であるかクローン林であるかを確認するためRAPD分析を行い、その後、各林分の平均木20個体の成長量、丸太の動的ヤング率および胸高部位の生材含水率、容積密度、心材色、仮道管長、曲げヤング率および曲げ強さを測定し、実生林とさし木林における木材性質の林分内変動と林分間差を検討した。

2.1 材料と方法

2.1.1 材料

図-2に示す大分県下のヒノキの実生3林分(S1, S2, S3)およびさし木2林分(N1, N2)の合計5林分を対象とした。各試験林の概況を表-1に示す。実生林は1ヘクタール当たり2700本あるいは3000本の標準的な植栽本数で、地上高4mまでの枝打ちが実施されている。一方、N1は1ヘクタール当たり5000本の高い植栽密度で地上高6mまで枝打ちされ、N2は1ヘクタール当たり1800本の低い植栽密度で地上高3mまで枝打ちされている。

本研究対象のさし木林は、所有者の植栽経緯あるいは樹幹および枝葉の形態的特徴から判断して、細枝系ナンゴウヒのさし木林と推測された。ナンゴウヒは、熊本県阿蘇地方で古くから育成されてきたヒノキのさし木品種であり、実生ヒノキに比べると発根性にすぐれ、トックリ病の発生が少ないなどの特性を持つ(宮島; 1989, 諫本; 1998)^{1,11)}とされている。また、ナンゴウヒは複数のクローンから構成されるクローンコンプレックスの品種であるが、苗木は単一の生産者から購入されるのが普通であるので、林分単位でみた場合、ナンゴウヒ林は単一のクローン林もしくは遺伝的変異の少ない個体群とみなすことができる。このような考えから、本研究ではさし木林としてナンゴウヒ林を用いた。



図-2 試験林の位置図

注：S1, S2, S3；実生林, N1, N2；さし木品種のナンゴウヒ林を表す。

表-1 試験林の概要

	S 1	S 2	S 3	N 1	N 2
増殖方法	実生	実生	実生	さし木	さし木
林齢 (年)	31	32	32	28	20
植栽密度 (本/ha)	2,700	3,000	3,000	5,000	1,800
立木密度 (本/ha)	1,350	1,550	2,200	4,100	1,350
間伐林齢 (年)	17, 27	20, 26	17	20	15
標高 (m)	350	400	300	600	600
傾斜	20°	20°	10°	20°	20°

注：N 1 および N 2 はナンゴウヒ由来のさし木林である。

2.1.2 試験方法

各林分が実生林であるかクローン林であるかを確認するために、1林分当たり16個体を無作為に選び、針葉を採取した。白石らの改良CTAB法（白石ら；1995）⁷²⁾により針葉からDNAを単離し、MagneSil (Promega) を用いて精製した後、RAPD分析に供した。

RAPD分析（Williamsら；1990）⁷³⁾は、4種類の13merプライマー（5'-GGACCCAACCAGG-3'、5'-GAGAGCCAACCTCG-3'、5'-GGAGGAGAGGTCG-3'、5'-GAGGATCCCTCGA-3'）を用いて行った。PCR反応液の組成は、1×PCR buffer, 0.025units/ μ l Platinum Taq DNAポリメラーゼ（以上Invitrogen）、2.0mM MgCl₂, 200 μ M 各dNTPs, 1.5 μ M プライマー、2 ng/ μ l 鋳型DNAである。サーモサイクラー（Applied Biosystems, GeneAmp 9600）の設定条件は、最初に94℃・60秒間（変性）の後、94℃・30秒間（変性）：50℃・30秒間（アニーリング）：72℃・60秒間（伸長）の3行程を40サイクル、最後に72℃120秒間（伸長）である。

平成15年4月から平成17年1月にかけて各林分の毎木調査を行い、胸高直径、樹高および立木密度を測定した後、各林分の平均胸高直径に近い20個体を選び、供試木とした。供試木を伐倒し、地上高0.2mから上方へ2m間隔で玉切り、地上高0.2-2.2mの1番丸太から末口径約3cm以上の丸太まで順次番号を付けた。皮付き丸太の密度およびFFTアナライザー（リオン製シグナルアナライザーSA-77）で縦振動法により測定した一次固有振動数から丸太の動的ヤング率を求めた。

このとき、全個体の胸高および地上高0.2mから2m毎に厚さ約3cmの円盤を採取し、ポリエチレン袋に密封して持ち帰り、髄を中心とする扇形試料を切り出し、髄から5年輪毎の小ブロックに割り、容積密度と生材含水率を測定した。なお、生材含水率は、目視により心材、移行材および辺材に再分割し測定した。また、各林分の円盤から節などの欠点がない1枚を選び、髄から最外年輪に向けて1年輪毎にマッチ棒状の試験片を切り出し、Schulze氏液を用いて解繊した後、サフランで染色し、万能投影機で拡大して1年輪あたり50本の晩材仮道管長を測定した。その結果に基づき、各林分20個体の髄から17年輪目の晩材仮道管長を同様に測定した。

次に、地上高1.2-2.2m部位の丸太を製材し、髄を含む厚さ30mmの桁目板を切り出し、気乾状態にした後、厚さ25mmにプレーナー加工し、L*a*b*表色系で心材色を測定した。その後、樹幹放射方向の変動を考慮して、髄から15年輪目付近から無欠点小試験体（25×25×400mm）を供試木1本につき2本作製し、含水率13%に調湿した後、スパン350mmの中央集中荷重で曲げ試験を行い、曲げヤング率（MOE）と曲げ強さ（MOR）を求めた。

表-2 各試験林の胸高直径と樹高

試験林	林齢 (年)	測定本数 (本)	胸高直径			胸高直径の年平均 成長量 (cm)	樹高 (m)
			平均値 (cm)	標準偏差 (cm)	変動係数 (%)		
S 1	31	262	21.3	4.5	21.2	0.76	14.4
S 2	32	227	20.1	3.5	17.3	0.72	12.9
S 3	32	211	19.4	3.6	18.4	0.64	13.4
N 1	28	224	13.2	1.7	12.9	0.54	14.0
N 2	20	132	18.1	2.3	12.7	0.98	12.1

注：樹高は供試木20個体の平均値である。

2.2 結果と考察

2.2.1 各林分のDNA分析結果

各林分のRAPD分析の結果、実生由来とされるS 1, S 2, S 3の3林分では、供試16個体がすべて異なるDNA型を示し、この3林分が実生林であることが確認された。一方、クローン苗植栽と推測されていたN 1とN 2の2林分のうち、N 1林分では全個体が同一DNA型を示し、単一クローン林分であることが示唆された。また、N 2林分では5種類のDNA型が観察され、それぞれの頻度は、6個体(38%)、4個体(25%)、4個体(25%)、1個体(6%)、1個体(6%)であった。このことから、この林分は複合クローン林分であった。

2.2.2 肥大成長のバラツキ

各林分の胸高直径と平均木20個体の胸高直径成長量の年平均値および平均樹高を表-2に示す。林齢もほぼ同じ実生3林分では、胸高直径の平均値が20cm前後の値を示し、胸高直径成長量の年平均値では立木密度の高いS 3がS 1およびS 2に比べやや小さかった。また、28年生で立木密度が高いN 1は平均胸高直径13.2cm、胸高直径成長量の年平均値0.54cmを示し、20年生で立木密度が低いN 2は同様に18.1cm、0.98cmを示し、両者の肥大成長は顕著に異なった。胸高直径の変動係数は、実生3林分が20%前後で、ナンゴウヒ林のN 1およびN 2の13%弱に比べて大きな値を示した。ここで胸高直径の林分内変動と施業履歴の関係を表-1から見てみると、S 3, N 1およびN 2の3林分では1回しか間伐が行われておらず73-82%の高い立木残存率を示したが、S 1およびS 2は2回の間伐により立木残存率が約50%と低かった。本研究対象の5林分では主に劣勢木の除去を目的とした間伐が行われているため、間伐回数が多く立木残存率が低い林分における胸高直径のバラツキは小さくなると推測されるが、ナンゴウヒ林のN 1およびN 2では間伐回数や立木残存率に関わらず林分内変動が小さかった。このことは単一クローン林あるいはクローンコンプレックス林における肥大成長のバラツキが実生林に比べ小さいことを示唆している。

一方、各林分の供試木20個体の平均樹高は、12.1-14.4mの比較的狭い範囲にあり、ナンゴウヒ林と実生林の違いは認められなかった。

2.2.3 胸高部位における容積密度の林分内変動

各林分ごとに髓から5年輪間隔で測定した胸高部位の容積密度を表-3に示す。容積密度は、各林分ともに髓近くで高く、髓からの年輪数の増加に伴って減少し、林齢の若いN 2を除く林分では円板の外周部で再び増加する傾向を示した。小ブロックごとの変動係数は、多少の高低はあるものの比較的安定した値

表-3 胸高部における容積密度

試験林		髓からの年輪番号					円盤平均	平均年輪幅 (mm)	
		1-5	6-10	11-15	16-20	21-25			26-
S 1	平均値 (kg/m ³)	465	419	400	396	391	391	406	3.8
	標準偏差 (kg/m ³)	37	26	29	32	33	23	25	
	変動係数 (%)	7.9	6.3	7.3	8.1	8.5	5.8	6.2	
S 2	平均値 (kg/m ³)	424	406	393	396	377	367	394	3.6
	標準偏差 (kg/m ³)	39	34	32	25	28	34	27	
	変動係数 (%)	9.1	8.3	8.2	6.2	7.4	9.3	7.0	
S 3	平均値 (kg/m ³)	422	404	386	380	380	392	390	3.2
	標準偏差 (kg/m ³)	32	28	26	24	29	32	23	
	変動係数 (%)	7.7	6.9	6.7	6.3	7.6	8.2	5.9	
N 1	平均値 (kg/m ³)	444	419	402	410	428		420	2.7
	標準偏差 (kg/m ³)	16	12	16	13	16		9	
	変動係数 (%)	3.7	2.9	4.0	3.2	3.8		2.1	
N 2	平均値 (kg/m ³)	422	395	356	361			380	4.9
	標準偏差 (kg/m ³)	18	12	10	15			8	
	変動係数 (%)	4.2	3.1	2.8	4.1			2.1	

注：円盤の容積密度は、扇形試験片の容積密度から推定した値である。

表-4 胸高部における心材と辺材の生材含水率

	心材					辺材				
	S 1	S 2	S 3	N 1	N 2	S 1	S 2	S 3	N 1	N 2
平均値 (%)	38	39	34	31	33	172	188	175	154	191
標準偏差 (%)	3.6	5.6	1.4	1.2	2.7	16.9	23.5	19.7	8.4	10.1
変動係数 (%)	9.6	14.6	4.3	3.9	8.4	9.9	12.5	11.3	5.4	5.3

を示しており、実生3林分が約6-9%、ナンゴウヒ2林分が約3-4%の低い値を示した。

扇形試験片から推定した円盤の平均容積密度は、林分間に植栽密度、立木密度、林齢の違いがあるため、平均値に多少の差異が認められた。すなわち、胸高部位の平均年輪幅が2.7mmのN1の容積密度は、それが4.9mmのN2に比べて約10%も大きい420kg/m³であった。また、この実生林における容積密度の変動係数は、福岡県の20年生および25年生林分を対象とした古賀ら(1992)¹⁹⁾の報告にある値(7.4%、6.5%)と非常に近似していた。次に、平均容積密度の変動係数は、林分間で異なり、ナンゴウヒのN1とN2が両者とも2.1%と小さいのに比べ、実生のS1、S2およびS3が5.9-7.0%と約3倍も大きかった。このようにナンゴウヒ林と実生林における胸高部位の容積密度の変動係数が異なった理由は、N1がナンゴウヒ単一クロンで遺伝的変異の無い個体群であり、N2がクロンコンプレックスであっても変異が小さかったためと推測された。

さらに、形成層齢15年以降を成熟材と仮定し、地上高0.2-4.2mの成熟材の容積密度について林分と地上高を因子とする分散分析を行った。その結果、林分間および地上高間に有意差が認められた。各地上高の容積密度の変動係数は、地上高間では大きな違いがないが、実生林の平均7.1%に比べ、ナンゴウヒ林は4.0%と小さな値を示した。

2.2.4 胸高部位における生材含水率の林分内変動

心材と辺材の生材含水率を表-4に示す。

心材では生材含水率が40%を超えるケースは少なく、5林分ともに平均値は30%台であった。5林分

表-5 L^* a^* b^* 表色系による心材色と最小有意差法 (L.S.D) による林分間の比較

色指数	試 験 林					分散寄与率 (%)	各林分間の比較	
	S 1	S 2	S 3	N 1	N 2			
L^*	平均値	79.7	79.1	80.7	80.7	80.8	20.5	$N2 \approx N1 \approx S3 \gg S1 \approx S2$
	標準偏差	1.6	1.4	1.3	1.4	1.4		
	変動係数 (%)	2.0	1.7	1.6	1.7	1.7		
a^*	平均値	8.1	8.1	8.7	5.7	5.9	58.2	$S3 \approx S1 \approx S2 \gg N2 \approx N1$
	標準偏差	1.4	1.3	1.0	0.6	0.8		
	変動係数 (%)	17.5	15.6	11.3	11.3	13.4		
b^*	平均値	22.6	22.2	22.2	21.2	21.0	34.7	$S1 \approx S2 \approx S3 \gg N1 \approx N2$
	標準偏差	0.9	1.3	0.8	0.6	0.8		
	変動係数 (%)	4.0	5.9	3.6	2.7	3.8		

注：>は1%レベルで有意， \approx は有意差なしを表す。

の心材含水率を比較すると、ナンゴウヒのN1とN2の平均値は類似した値を示すとともに、変動係数が実生のS1およびS2よりも小さかった。とくに、単一クローンのN1は最も小さい値を示した。

また、辺材は水分通導の役割を果たすために、生材含水率が最大含水率に近く、密度の影響を受ける（藤原ら；1988）²⁰⁾とされている。したがって、辺材の平均含水率は、5林分で異なり、後述する容積密度の大きいN1が最も低く、小さいN2が最も高かった。辺材含水率の変動係数は、実生3林分が9.9-12.5%であるのに比べ、ナンゴウヒ2林分が約5%と小さかった。これは、ナンゴウヒ林の辺材容積密度の林分内変動が実生林に比べて小さいことに起因している。

2.2.5 心材色の林分内変動と林分間差

心材色の測定結果を表-5に示す。 L^* 値は、ナンゴウヒのN1、N2および実生のS3が実生のS1およびS2より大きかった。最小有意差法 (L.S.D) により3つの色指数の林分間差を比較すると、 a^* 値および b^* 値は、実生林のS1、S2およびS3がナンゴウヒのN1およびN2より大きく、実生林間およびナンゴウヒ林間では差がなかった。すなわち、実生林では鮮やかな桃色を示す個体が多く存在し、ナンゴウヒ林では淡桃白色のものが多かった。また、 L^* 値、 a^* 値および b^* 値の林分内変動は、ナンゴウヒ林の方が実生林よりもやや小さい傾向にあった。なお、3つの色指数のうち、 a^* 値は林分間の差が最も大きく、また林分内における個体間のバラツキが大きい指数と考えられた。

2.2.6 胸高部位における晩材仮道管長の林分内変動

各林分から1枚ずつ選んだ円板の樹幹放射方向の晩材仮道管長は、髄からの年輪数の増加に伴って増大し、概ね15年輪目付近で安定して推移した。そこで、N2林の胸高部における年輪数が17-18年輪であるため、髄から17年輪目の晩材仮道管長を測定することにし、この結果を表-6および図-3に示す。

ナンゴウヒ林の晩材仮道管長は2林分とも平均値が2.9mm台、変動係数が3%弱の値を示し、実生3林分では平均値が2.54-2.76mm、変動係数が5.7-7.0%の値を示し、ナンゴウヒ林と実生林の間に長さバラツキの違いが認められた。このようにナンゴウヒ林と実生林の晩材仮道管長の変動係数が異なった理由は、容積密度の項で述べたと同様にN1がナンゴウヒの単一クローンで遺伝的変異の無い個体群であり、N2がクローンコンプレックスであっても変異が小さかったためと推察された。なお、実生林の晩材仮道管長は、容積密度の項で引用した古賀ら（1992）¹⁹⁾の報告と平均値（2.64mm, 2.55mm）および変動係数（5.7%, 7.7%）が近似していた。

表-6 胸高部における髓から17年輪目の晩材仮道管長

	S 1	S 2	S 3	N 1	N 2
平均値 (mm)	2.54	2.57	2.76	2.95	2.90
標準偏差 (mm)	0.14	0.15	0.19	0.09	0.08
変動係数 (%)	5.7	5.8	7.0	2.9	2.8

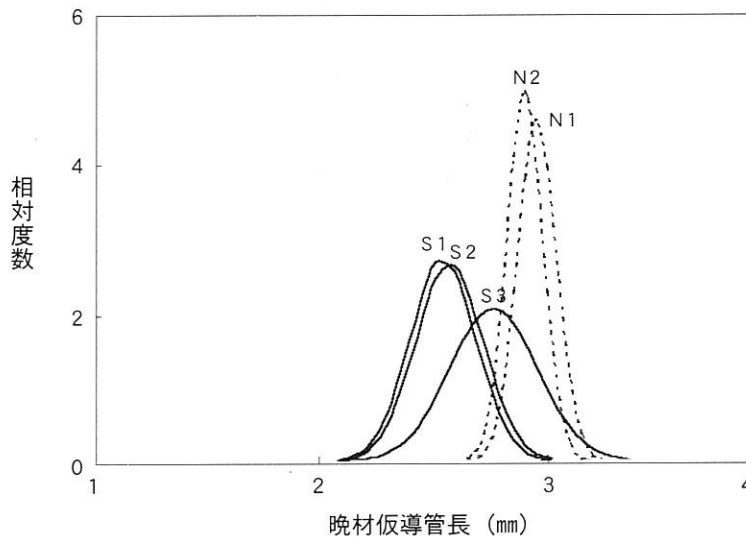


図-3 各試験林の胸高部位17年輪目における晩材仮道管長の正規分布図

また、ナンゴウヒのN1とN2では、植栽密度あるいは立木密度が極端に異なるため、1年あたりの胸高直径成長量が2倍も異なるにもかかわらず、髓から17年輪目の仮道管長に差が認められなかった。このことから、仮道管長に及ぼす成長量の影響は小さいと推察された。

2.2.7 動的ヤング率の林分内変動と樹高方向変動

各林分の1番丸太から6番丸太までの動的ヤング率を表-7に示す。各丸太番号ごとの動的ヤング率の平均値は、林分ごとに差がみられるものの、実生林とナンゴウヒ林との違いは認められなかった。しかし、それらの変動係数は、ナンゴウヒ2林分が実生林に比べやや小さい傾向にあった。

次に、動的ヤング率の樹高方向の変動には、図-4に示すように、実生林とナンゴウヒ林で一定の異なる傾向が認められた。すなわち、実生3林分が1番丸太から2番丸太にかけて大きく増大し、それより上部では比較的安定して推移するのに対し、ナンゴウヒ2林分は1番丸太から上部丸太にかけてほぼ横ばいで推移し、上部の6番丸太で若干低下する傾向を示した。そこで、2番丸太(2.2-4.2m)の1番丸太(0.2-2.2m)に対する比を比較してみると、実生3林分の比は平均1.27で、ナンゴウヒ2林分の平均1.01に比べて大きかった。また、第4章の接ぎ木苗によるヒノキ精英樹50クローンの比が平均1.07であることから、実生林はさし木林や接ぎ木林より動的ヤング率の樹高方向変動が大きいと考えられた。さらに、動的ヤング率と平均容積密度の関係を各林分の1番丸太と2番丸太ごとに見ると、N1の1番丸太および2番丸太とS3の2番丸太には両者の間にそれぞれ1%水準で有意な正の相関関係($r=0.76$, $r=0.78$, $r=0.63$)

表-7 各試験林における丸太番号ごとの動的ヤング率

試験林		丸太番号					
		1	2	3	4	5	6
S 1	平均値 (Gpa)	7.22	9.58	10.01	10.14	10.53	9.59
	標準偏差 (Gpa)	1.13	1.34	1.24	1.34	1.96	1.74
	変動係数 (%)	15.7	14.0	12.4	13.2	18.6	18.1
S 2	平均値 (Gpa)	6.41	8.36	8.63	8.38	8.11	7.85
	標準偏差 (Gpa)	1.16	0.93	0.76	1.26	1.25	1.58
	変動係数 (%)	18.1	11.2	8.8	15.1	15.4	20.1
S 3	平均値 (Gpa)	8.55	10.22	10.02	9.83	9.58	9.26
	標準偏差 (Gpa)	1.71	1.10	0.92	0.91	1.05	0.65
	変動係数 (%)	20.0	10.8	9.2	9.2	11.0	7.0
N 1	平均値 (Gpa)	10.57	10.52	10.44	10.27	9.75	9.74
	標準偏差 (Gpa)	0.76	0.88	0.84	0.95	1.07	0.92
	変動係数 (%)	7.2	8.3	8.0	9.3	11.0	9.4
N 2	平均値 (Gpa)	7.71	7.85	7.90	7.87	7.93	7.85
	標準偏差 (Gpa)	0.93	0.72	0.71	0.85	0.99	0.92
	変動係数 (%)	12.0	9.1	8.9	10.8	12.5	11.7

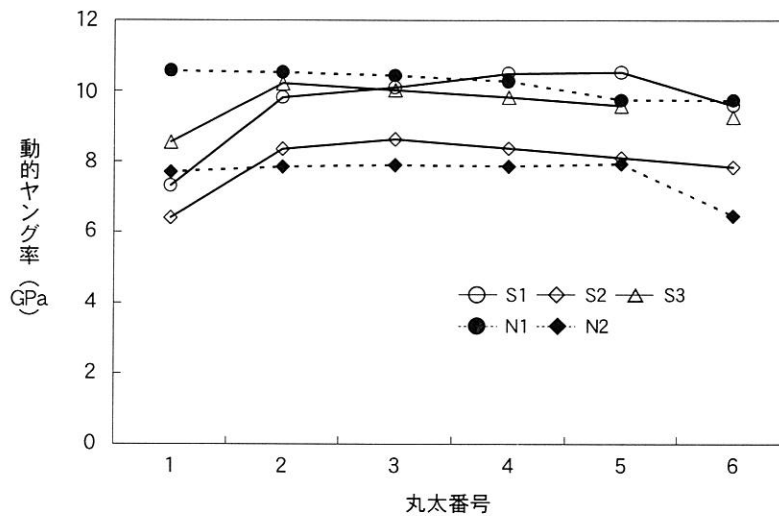


図-4 各試験林における動的ヤング率の樹高方向の変動

が認められたが、そのほかには統計的な関係は認められなかった。このような実生林とさし木林あるいは接ぎ木林における動的ヤング率の樹高方向変動の違いの原因は、増殖方法の違いによる地際付近の樹形あるいは仮道管二次壁中層のミクロフィブリル傾角など木材性質の相違が関与しているものと推察された。

2.2.8 気乾密度、曲げヤング率および曲げ強さの林分内変動と林分間差

曲げ試験の結果を表-8に示す。各林分の植栽密度や林齢などの生育条件が異なっており、植栽密度が低く林齢が最も若いN2は、気乾密度、MOEおよびMORが他の4林分のそれらに比べいずれも小さな値を示した。これらの木材性質の平均値にはナンゴウヒ林と実生林の違いは認められないが、変動係数はいずれもナンゴウヒ林が実生林に比べてやや小さかった。そこで、気乾密度とMOEおよびMORとの関係について検討した。一般に、密度とMOEまたはMORの間には正の相関関係が存在するので、気乾密度が大きい試験片（容積密度が大きい林分）ではMOEとMORはともに高い値を示し、全供試木の気乾密度とMOE、気乾密度とMOR、MOEとMORの間にはそれぞれ1%水準で有意な正の相関関係が認められた。また、

表-8 各試験林の気乾密度, MOEおよびMORと最小有意差法 (L.S.D) による林分間の比較

力学的性質	試験林					分散寄与率 (%)	各林分間の比較	
	S 1	S 2	S 3	N 1	N 2			
気乾密度	平均値 (g/cm ³)	0.49	0.49	0.47	0.49	0.44	36.7	S1≒S2≒N1≫S3≫N2
	標準偏差 (g/cm ³)	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02		
	変動係数 (%)	6.9	7.6	6.8	3.4	4.0		
MOE	平均値 (GPa)	9.56	8.41	9.31	9.02	7.47	50.2	S1≒S3≒N1>S2≫N2
	標準偏差 (GPa)	1.10	0.73	0.82	0.52	0.53		
	変動係数 (%)	11.5	8.6	8.8	5.7	7.1		
MOR	平均値 (MPa)	84.4	85.7	90.5	89.1	73.8	40.4	(S3≒N1)>S2≒S1≫N2
	標準偏差 (MPa)	7.8	9.4	9.0	5.8	3.5		
	変動係数 (%)	9.2	10.9	9.9	6.6	4.7		

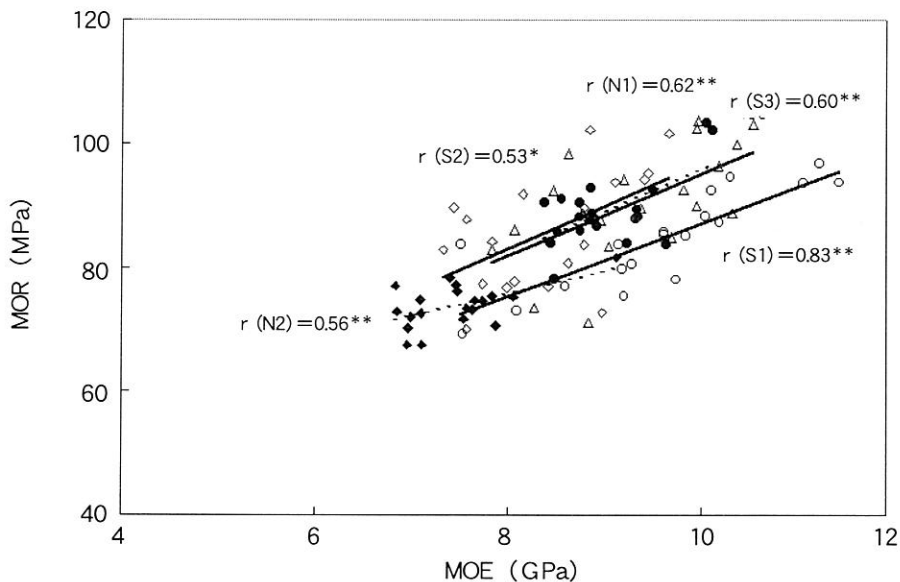


図-5 MOEとMORの関係

注：図中データは、○；S 1, ◇；S 2, △；S 3, ●；N 1, ◆；N 2を表す。r(S 1)~r(N 2)は各林分のMOEとMORの相関係数を示し、**は1%レベルで有意あり、*は5%レベルで有意ありを表す。回帰直線は、実生林を実線、ナンゴウヒ林を点線で示す。

図-5に示すとおり、各林分内のMOEとMORの間にも相関関係が認められた。

次に、気乾密度以外の因子の影響を検討するため、比ヤング率および比強度を比較した。両者の各林分の平均値の順位は変わらなかったが、N 2と他の4林分の差は小さくなった。また、実生林とナンゴウヒ林に差異は認められなかったが、比ヤング率と比強度の変動係数のうち単一クローンであるN1の変動係数は両者とも4%台の最小値を示し、クローンコンプレックスであるN 2もやや小さな値を示した。このことは、気乾密度以外の影響が存在していることを示しており、平川ら (1997)⁷⁸⁾ がスギのヤング率への仮道管二次壁中層のミクロフィブリル傾角の影響を指摘しているように、ヒノキにおいてもその影響が存在する可能性を示唆している。

2.3 結論

ヒノキの実生林とさし木林における木材性質のバラツキを把握するために、実生ヒノキ3林分60個体およびナンゴウヒ2林分40個体を用いて実験し、肥大成長、容積密度、生材含水率、心材色、仮道管長、丸太の動的ヤング率および力学的性質の林分内のバラツキおよび林分間差の検討を行った。その主な結果は次のとおりであった。

- (1) ナンゴウヒ林における胸高直径の変動係数は13%程度であり、実生林の20%前後に比べて小さかった。
- (2) 胸高部位における扇形試験片の容積密度は、平均年輪幅の大きな林分が小さな値を示す傾向にあり、ナンゴウヒ林の変動係数が約2%で実生林の1/3程度と小さかった。
- (3) 胸高部位における心材の生材含水率は全林分とも30%台であり、その変動係数はナンゴウヒ林が実生林よりやや小さかった。一方、辺材生材含水率の変動係数は、ナンゴウヒ林が5%台で小さく実生林の約1/2であった。また、実生林は、ナンゴウヒ林に比べて鮮やかな桃色の心材色をもつ個体が多く、 L^* 値、 a^* 値および b^* 値の変動係数がナンゴウヒ林に比べてやや大きかった。
- (4) ナンゴウヒ林における胸高部位17年輪目の晩材仮道管長は、平均値が2林分とも2.9mm台で実生3林分の平均値2.62mmに比べ長く、変動係数が3%弱で小さく実生林の約1/2であった。
- (5) ナンゴウヒ林の丸太動的ヤング率は、いずれの丸太番号においても変動係数が実生林よりやや小さく、樹幹高さ方向の変動では1番丸太と2番丸太の比が実生林に比べて顕著に小さかった。
- (6) 気乾密度、MOEおよびMORの平均値には実生林とナンゴウヒ林の違いが認められなかったが、それらの変動係数はいずれもナンゴウヒ林が実生林に比べて小さかった。

以上のことから、ヒノキさし木林（ナンゴウヒ）の木材性質の林分内変動は、実生林に比べ小さいことが明らかとなった。したがって、用途に適した木材性質をもつ個体の選抜・増殖が可能であれば、利用目的に適合した木材を安定供給できるという点で、ヒノキクローン林業は有益であると考えられた。次に、品種間・クローン間で木材性質にどの程度の差異があるかを把握する必要がある。

第3章 スギ在来品種の成長と木材性質

本章では、第2章でさし木のナンゴウヒ林における成長と木材性質の林分内変動が実生林に比べ明らかに小さかったことから、MuPS分析によるDNA鑑定で品種を同定した九州産スギ在来品種16品種を用いて、スギ在来品種のそれぞれに特有な成長と木材性質を把握し、各木材性質の樹幹内変動および品種間差を検討した。

3.1 材料と方法

3.1.1 材料

大分県湯布院町の西日本主要スギ品種展示林（昭和57年3月設定、22年生）に植栽された27品種を対象とした。この展示林は、標高800mの南向き緩斜面に位置し、1ヘクタールあたりの植栽密度が3687本であり、15年生時と20年生時に間伐が実施されている。

実験に先立ち、それぞれの植栽品種の1年生針葉を用いMuPS (Multiplex PCR of SCAR markers) 分析を行い、久枝ら (2003)³²⁾ のMuPS型データベースと照合することにより品種名を同定した。MuPS分析は、PCRおよびアガロースゲル電気泳動のみの簡便な操作で分析を行うことができ、しかも再現性が高いとされるDNA鑑定法であり、分析結果が19桁の2進法で示されるMuPS型として表記される。また、本研究で用いたMuPS型データベースは、各在来品種の産地の公的研究機関が品種基準木として指定し、保存している九州産スギ在来品種75品種および九州産スギ精英樹589クローンのMuPS分析に基づき作成されたデータベースである。

本研究では、MuPS型データベースと一致した16品種を研究対象とした（表-9）。なお、品種の名称とその成長型は宮島 (1989)¹⁾ ならびに川野 (1981)⁷⁴⁾ に従った。

3.1.2 試験方法

毎木調査で胸高直径を測定した後、各品種の平均胸高直径に近い3個体を供試木として選び伐倒した。各供試木を地上高0.2mから2m毎に玉切り、地上高0.2-2.2mの1番丸太から順に末口径3cm以上の丸太まで丸太番号を付けた。皮付き丸太の密度およびFFTアナライザー（リオン(株)製シグナルアナライザーSA-77）で縦振動法により測定した一次固有振動数から丸太の動的ヤング率を求めた。樹高の高いイワオ、ナカムラおよびクモトオシでは8番丸太まで測定できたが、樹高の低いホンスギでは5番丸太までしか測定できなかった。胸高および地上高0.2m部位から2m毎に厚さ約4cmの円盤を2枚ずつ採取し、ポリエチレン袋に密封して持ち帰った。直ちに2枚のうち1枚目の円盤から髄を中心とする扇形試料を切り出し、髄から5年輪毎の小ブロックに割り、容積密度と生材含水率を測定した。なお、生材含水率は、目視による材色の違いから心材、移行材および辺材に細分割し測定した。2枚目の円盤では、髄を通る長径とその直角方向の4方向の年輪数と年輪幅を測定し、樹幹解析を行った。

次に、地上高1.2-2.2m部位の丸太から、髄を通る厚さ30mmの柵目板を切り出し、気乾状態まで乾燥した後、厚さ25mmにプレーナー加工し、柵目面の材色を $L^*a^*b^*$ 表色系で測定した。なお、測定器はスガ試験機(株)製（スポット径5mm）のカラーテスターを用い、測定箇所は辺材2箇所および心材5箇所とした。さらに、柵目板の成熟材部から2つの無欠点小試験体（25×25×75mmおよび25×25×400mm）を作製し、縦圧縮試験および曲げ試験を行った。なお、試験機は島津製作所製AG10Tで、試験条件はJIS Z 2101に準じ、縦圧縮試験では荷重速度1mm/分とし、曲げ試験ではスパン350mmで荷重速度5mm/分の柵目面荷重

表-9 スギ在来16品種のMuPS型, 成長型および試験林の概要

No.	品種名	MuPS型			成長型	立木本数 (本)	胸高直径 (cm)			樹高 (m)
							平均値	標準偏差	変動係数(%)	
1	イワオ	009010	1110010	010011	(a)	46	23.7	4.0	16.9	18.8
2	ナカムラ	000900	0000001	110110	(a)	55	23.4	3.1	13.3	18.5
3	ヒノデ	100190	0011010	001110	(a)	51	23.3	4.0	17.2	23.3
4	タケノサコ	001010	0010010	010110	(a)	44	23.0	3.4	14.7	23.0
5	ヤマグチ	000010	1101010	110010	(a)	35	21.2	4.4	20.5	16.5
6	クモトオシ	091000	1110000	110110	(a)	53	20.7	3.0	14.6	18.0
7	ヤイチ	009090	0000100	011109	(a)	49	19.8	4.8	24.5	16.4
8	ガリン	000000	1010000	110110	(a)	56	19.7	2.7	13.4	19.7
9	エダナガ	000010	0010000	110110	(a)	43	18.7	2.8	14.9	18.7
10	オオノ	019900	0010000	110110	(a)	51	18.3	2.0	11.0	17.1
11	アカバ	019010	1110010	010111	(b)	44	19.0	4.1	21.7	15.3
12	オビアカ	000010	1010010	110010	(b)	23	19.4	3.0	15.6	19.4
13	ヤブクグリ	011900	0010101	110110	(b)	43	17.6	2.7	15.2	17.6
14	メアサ	001100	1000110	110110	(c)	45	19.1	2.5	13.1	19.1
15	アヤスギ	010010	1110111	010111	(c)	54	17.8	1.8	10.3	17.8
16	ホンスギ	010110	1010111	010111	(c)	38	15.7	2.3	14.7	12.5
合計または平均値						730	20.1	4.0	19.8	18.2

注：MuPS型は、フラグメントが明瞭なものを1，無いものを0，不明瞭なものを9で表す。成長型は，早生型の成長を示す品種を(a)，中性型の成長を示す品種を(b)，晩生型の成長を示す品種を(c)で表す。樹高は供試木3個体の平均値を表す。

とした。試験時の試験体の含水率は $15.5 \pm 0.5\%$ であった。

3.2 結果と考察

3.2.1 MuPS分析による品種同定

今回対象とした27品種のMuPS型を久枝ら(2003)³²⁾のMuPS型データベースと照合した結果，表-9に示す16品種のMuPS型がデータベースと一致し，5品種のMuPS型がデータベースに存在しなかった。すなわち，トサアカ，アラカワ，オビアカおよびキジンの4品種がそれぞれデータベースのオビアカ，ガリン，エダナガおよび精英樹の県始良52号と同じMuPS型を示し，タノアカのMuPS型はデータベースの中に該当するMuPS型が存在しなかった。また，ヒゴメアサ，サツマメアサおよびアオスギは，数種のDNA分子マーカーを用いた分析でも同じMuPS型を呈したことから判断して同一品種であると考えられた。そのため，本研究ではメアサという名称を用い，アオスギの供試木を対象品種に加えた。ヤクスギ，オキノヤマ，タブセおよびカジュウの4品種は，実生品種であるためMuPS分析による品種同定ができなかった。また，サンプルはMuPS型データベースを持たないため照合できなかった。

以上のことから，スギ品種の材質等の研究にあたっては，事前に針葉や樹幹等の形態的特徴に基づく品種識別に加えて，可能な限りDNA情報に基づいた鑑定による品種同定を行う必要がある。

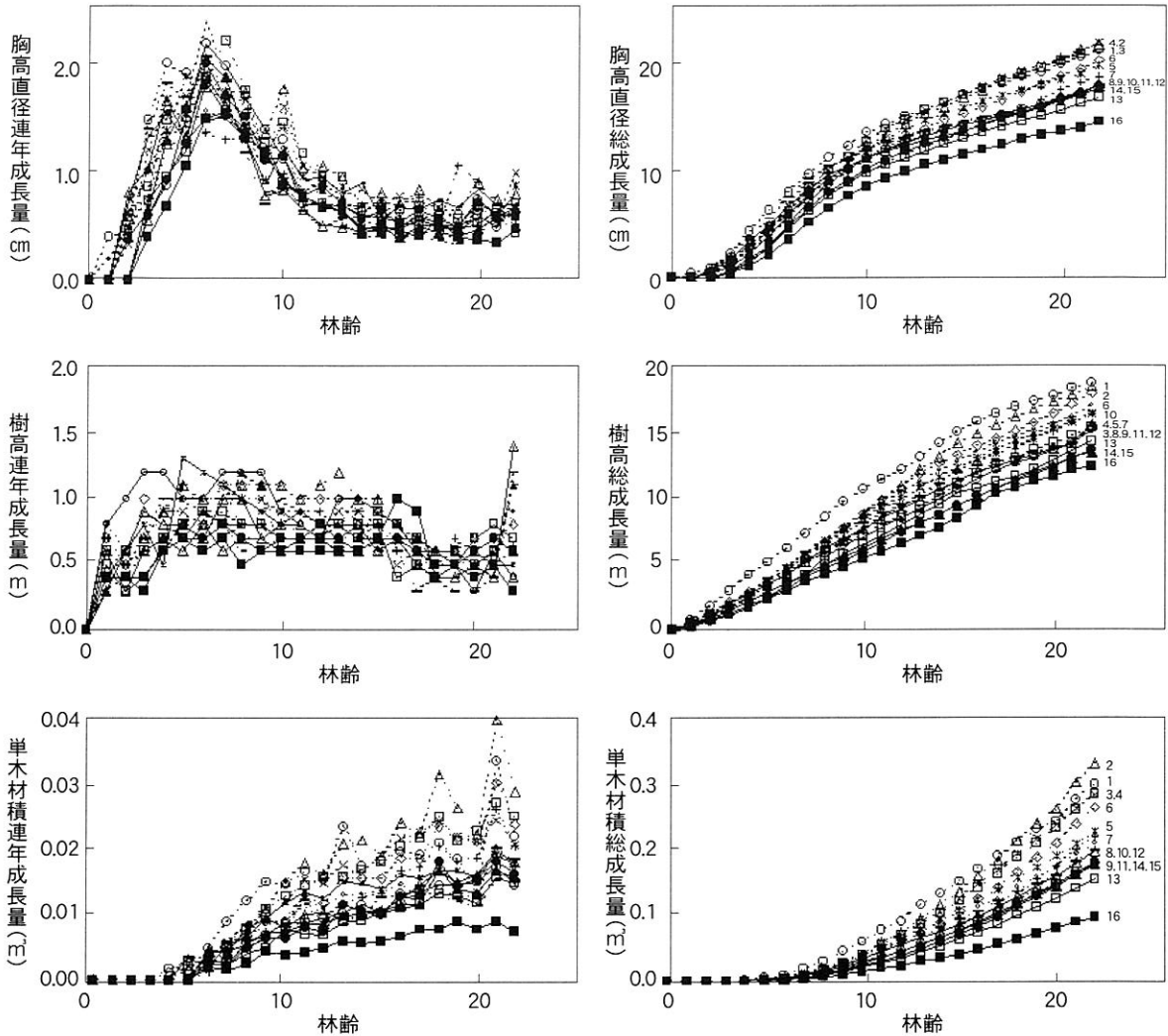


図-6 胸高直径，樹高，単木材積の連年成長量と総成長量

注：イワオ；…○…1，ナカムラを；△…2，ヒノデ；…□…3，タケノサコ；…×…4，ヤマグチ；…*…5，クモトオシ；
…◇…6，ヤイチ；…+…7，ガリン；…-…8，エダナガ；…-…9，オオノ；…-…10，アカバ；-○-11，オビアカ；
-△-12，ヤブクグリ；-□-13，メアサ；-●-14，アヤスギ；-▲-15，ホンスギ；-■-16を表す。

3.2.2 樹幹解析によるスギ品種の成長

毎木調査による全立木の平均胸高直径が20.1cm，平均樹高が18.2mであり，大分県スギ人工林収穫表（1982）⁷⁵⁾の地位Iに相当した。各品種の平均胸高直径は，15.7-23.7cmの範囲にあり，イワオ，ナカムラなどの早生型の成長を示す品種が大きく，アヤスギ，ホンスギなどの晩生型の成長を示す品種が小さかった。

各品種の供試木3個体の樹幹解析から得た平均胸高直径，平均樹高および平均単木材積の年成長量と総成長量を図-6に示す。平均胸高直径の年成長量は，全品種とも6年目に最大となり，13年目以降は0.6cm前後のほぼ安定した値で推移した。平均樹高の年成長量は各品種とも比較的安定した値で推移したが，平均単木材積の年成長量は林齢に伴い増大する傾向にあった。胸高直径総成長量は14.1-21.1cmの範囲にあり，最大値と最小値の比が約1.5倍と大きかった。同様に，樹高総成長量は11.7-17.8mの範囲でその比が約1.5倍，単木材積総成長量は0.080-0.261m³の範囲でその比が約3.3倍と品種間で大きく異なった。以上のように，同一林分内に同時に植栽されているにもかかわらず，各品種の成長には明らかな差異が認められた。

表-10 スギ在来16品種の各地上高における心材, 移行材および辺材の生材含水率

No.	品種名	心材 (%)				移行材 (%)				辺材 (%)			
		0.2m	1.2m	2.2m	4.2m	0.2m	1.2m	2.2m	4.2m	0.2m	1.2m	2.2m	4.2m
1	イワオ	146	110	89	67	115	102	87	117	274	256	247	248
2	ナカムラ	204	131	102	91	105	75	90	61	262	263	251	186
3	ヒノデ	135	89	72	63	124	131	93	109	295	288	261	255
4	タケノサコ	203	116	83	109	109	73	84	70	281	270	275	259
5	ヤマグチ	148	87	82	71	103	93	94	87	253	221	217	186
6	クモトオシ	195	206	139	142	112	114	80	83	246	279	262	256
7	ヤイチ	73	60	56	57	96	101	106	91	284	240	214	196
8	ガリン	151	97	97	114	88	65	87	80	229	225	223	230
9	エダナガ	118	105	111	110	83	66	74	63	210	206	214	224
10	オオノ	108	78	62	60	95	89	76	100	234	253	228	242
11	アカバ	90	87	74	60	90	106	95	94	266	255	241	233
12	オビアカ	161	118	106	105	79	97	75	69	245	235	226	219
13	ヤブクグリ	110	85	67	69	112	99	77	104	231	221	231	192
14	メアサ	91	70	65	79	98	75	99	84	255	295	250	264
15	アヤスギ	79	89	71	64	133	90	105	99	287	255	249	243
16	ホンスギ	75	60	53	54	88	80	68	87	265	224	216	201
	平均値	130	99	83	82	102	91	87	87	257	249	238	227
	標準偏差	44.8	34.9	23.1	26.3	15.1	18.1	11.2	16.3	23.9	26.1	19.3	27.4
	変動係数 (%)	34.4	35.2	27.8	32.0	14.8	19.9	12.9	18.6	9.3	10.5	8.1	12.1

3.2.3 心材, 移行材および辺材の生材含水率

各品種の生材含水率を表-10に示す。各品種3個体間の心材, 移行材および辺材の生材含水率は極めて類似していた。地上高0.2mの心材の生材含水率は, ナカムラ, タケノサコおよびクモトオシが200%前後, オビアカ, ガリン, ヤマグチおよびイワオが150%前後と高く, ヤイチ, ホンスギおよびアヤスギが70%台と低かった。地上高1.2m以上における心材の生材含水率は, 地上高0.2mに比べ低い傾向にあった。スギ樹幹内の生材含水率は品種あるいは樹幹の部位で異なり, 心材の生材含水率は遺伝的に強く支配され, 品種固有の性質であると藤澤ら (1995)³⁴⁾ が報告している。本研究で対象にした各品種の心材の生材含水率は河澄ら (1991a, 1991b)^{39,40)} や森川ら (1996)⁵⁸⁾ の報告にある値と大差がなく, 本研究においてもスギの心材含水率は品種固有の値をもつことが示された。

3.2.4 心材色と辺材色

各品種の辺材および心材のL*値, a*値, b*値を表-11に示す。各品種3個体の心材L*値およびa*値に1%水準で, b*値に5%水準で有意な品種間の差が認められた。心材a*値の変動係数(26.6%)がL*値またはb*値のそれ(4%台)に比べて高い傾向は, 対象クローンや測定器のスポット径が異なるものの, 平川ら (2003)⁵⁰⁾ の報告でも示されている。心材の3つの色指数のうち, 心材L*値と心材a*値の間には負の相関(r=-0.549**)が認められた。今回の結果では, 心材のL*値が低い, いわゆる黒心と判断される心材をもつ品種としてナカムラやクモトオシを, 逆にそれが高い, いわゆる赤心と判断される心材をもつ品種としてアカバ, メアサ, アヤスギおよびヤイチをあげることができた。

これらの結果は, これまでの心材色に関する報告(河澄ら; 1991a, 同左; 1991b)^{39,40)} と一致し, 心材色も品種固有の特性であることが確認できた。また, 心材のL*値とその生材含水率との間に負の相関

表-11 スギ在来16品種の材色と各地上高における容積密度

No.	品種名	辺材色			心材色			容積密度 (kg/m ³)						
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	0.2m	1.2m	2.2m	4.2m	6.2m	8.2m	樹幹平均
1	イワオ	77.8	1.9	19.7	72.2	7.3	23.6	288	296	295	302	310	315	306
2	ナカムラ	80.9	1.4	20.4	69.2	11.2	23.6	276	272	286	297	288	290	289
3	ヒノデ	79.4	2.1	19.9	70.3	9.3	22.6	271	273	284	293	307	313	294
4	タケノサコ	80.7	2.5	19.0	75.4	8.7	22.5	270	270	265	270	289	296	279
5	ヤマグチ	79.3	1.3	19.5	73.1	5.7	22.9	290	302	312	302	311	319	312
6	クモトオシ	79.8	2.1	20.6	67.6	8.0	22.8	295	284	290	294	300	309	298
7	ヤイチ	78.2	1.6	20.5	76.7	7.0	22.7	302	315	331	330	338	337	328
8	ガリン	80.5	0.9	19.7	73.4	6.1	24.5	300	313	316	309	299	313	310
9	エダナガ	78.6	1.7	21.6	72.2	9.8	23.8	325	325	315	311	326	317	320
10	オオノ	78.8	2.7	21.2	74.5	9.5	23.3	310	311	322	315	331	339	327
11	アカバ	77.9	1.0	21.6	77.3	5.0	23.5	316	303	319	319	335	340	325
12	オビアカ	80.9	2.2	20.3	74.6	8.3	22.0	315	308	310	319	317	326	318
13	ヤブクグリ	80.5	1.4	20.8	72.1	8.2	24.4	355	336	329	354	354	345	345
14	メアサ	81.4	0.8	19.1	77.5	3.7	23.8	297	276	292	296	301	300	295
15	アヤスギ	79.7	2.4	20.8	76.7	5.7	24.3	295	305	310	319	336	360	321
16	ホンスギ	78.0	2.5	19.3	73.9	9.6	24.6	312	345	337	358	407	387	358
	平均値	79.5	1.8	20.2	73.5	7.7	23.4	301	302	307	312	322	325	314
	標準偏差	1.2	0.6	0.8	2.9	2.0	0.8	22	23	20	22	30	25	21
	変動係数 (%)	1.5	34.7	4.1	3.9	26.6	3.4	7.1	7.5	6.4	7.2	9.2	7.7	6.6

関係が存在しており、河澄ら (1991 a)³⁹⁾ が報告しているように心材色が濃い品種ほど心材の生材含水率が高いことが示された。

3.2.5 各地上高ごとの容積密度

各品種の地上高0.2-8.2m部位における扇形試料の容積密度 (表-11) について、品種および地上高を因子とする分散分析を行った。その結果、品種間および地上高間にそれぞれ1%水準で有意な差が認められた。品種の分散寄与率は地上高のそれより大きかった。樹幹の平均容積密度は、晩生型の成長を示すホンスギが最も高い値を示し、最小のタケノサコの約1.3倍であった。メアサを除く中生型および晩生型の成長を示す品種は全品種の平均値314kg/m³より大きい値を示し、成長型による容積密度の違いも明らかになった。一方、各品種の容積密度は、地上高が2m増すごとに1.2-3.2%ずつ増大し、樹幹上部ほど高い値を示した。

3.2.6 各品種の丸太動的ヤング率とその樹高方向変動

各品種の丸太番号ごとの動的ヤング率を図-7に示す。また、品種および丸太番号を因子とする動的ヤング率の分散分析結果を表-12に示す。品種間および丸太番号間に1%水準で有意な差が認められ、丸太番号間の分散寄与率よりも品種間のそのの方が大きかった。各品種の1番丸太から5番丸太の動的ヤング率平均値は、クモトオシが7.02GPaで最も大きく、最小のヤブクグリの約1.8倍の値を示した。また、1番丸太と2番丸太の動的ヤング率の比は、全品種の平均値が1.26であり、中生型および晩生型の成長を示す品種がそれよりも高く、早生型の成長を示す品種の多くがそれよりも低い傾向にあった。各品種の樹高方向における動的ヤング率の変動パターンは、樹幹直径の小さい上部の未成熟材だけで形成された丸太

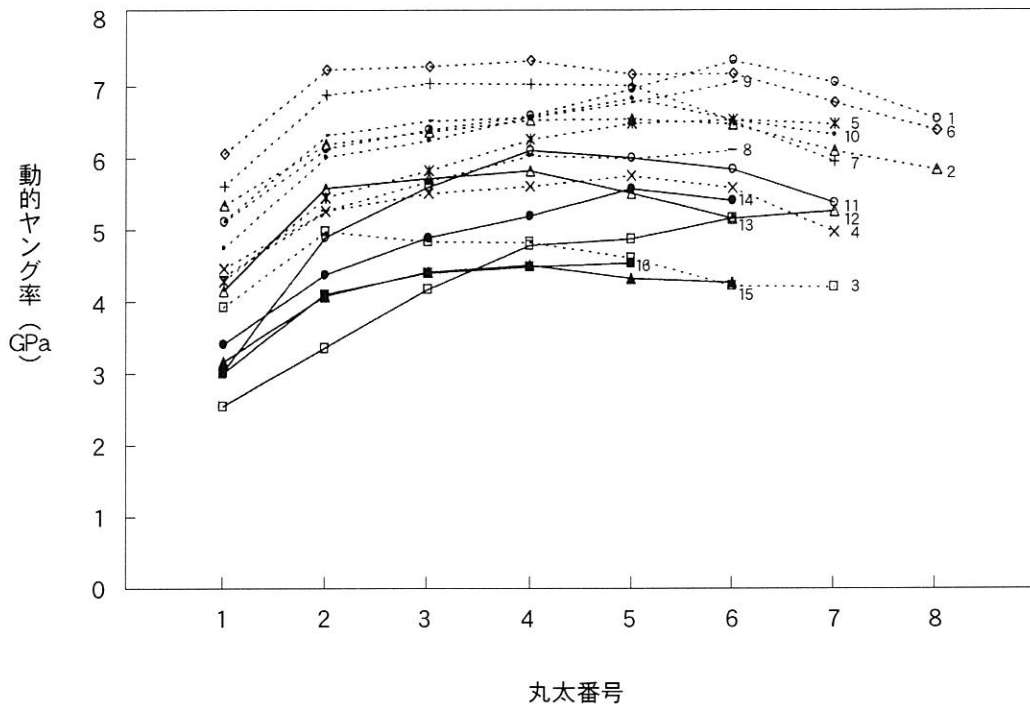


図-7 スギ在来16品種の丸太動的ヤング率の樹高方向の変動

注：イワオ；…○…1, ナカムラを；△…2, ヒノデ；…□…3, タケノサコ；…×…4, ヤマガチ；…*…5, クモトオン；
 …◇…6, ヤイチ；…+…7, ガリン；…-…8, エダナガ；…-…9, オオノ；…-…10, アカバ；-○-11, オビアカ；
 -△-12, ヤブクグリ；-□-13, メアサ；-●-14, アヤスギ；-▲-15, ホンスギ；-■-16を表す。

表-12 動的ヤング率の分散分析表

要因	DSS	df	MS	Fv	Pv	D	VC (%)
品種 (A)	202.2	15	13.5	95.76	0.000	**	61.4
丸太番号 (B)	91.4	4	22.8	162.31	0.000	**	27.8
A × B	13.2	60	0.2	1.56	0.015	*	4.0
誤差	22.5	160	0.1				6.8
全体	329.3	239					100.0

注：DSS；偏差平方和, df；自由度, MS；平均平方, Fv；F値, Pv；P値, D；判定, **；1%水準で有意差あり, *；5%水準で有意差あり, VC；分散寄与率を表す。

を除けば、地上高が高くなるにつれ増加するパターンと1番丸太が低くそれより上部では1番丸太よりもやや高い値で比較的安定するパターンが存在し、前者が中生型もしくは晩生型の成長を示す品種、後者が早生型の成長を示す品種に認められた。山下ら (2000)⁶⁰⁾ によるスギ18品種の樹幹内における動的ヤング率の変動に関する報告と本研究とは林齢や丸太の採材部位が異なるものの、アヤスギの値とイワオの変動パターンを除けば類似点が多く、動的ヤング率の樹高方向における品種固有の変動パターンが存在することが示唆された。

表-13 無欠点小試験体から得たスギ在来16品種の力学的性質

No.	品種名	試験体数	含水率 (%)	平均年輪幅 (mm)	気乾密度 (g/cm ³)	縦圧縮強さ (MPa)	曲げヤング率 (GPa)	曲げ強さ (MPa)	曲げ仕事量 (J)
1	イワオ	6	15.1	3.6	0.388	25.2	6.85	62.0	1.59
2	ナカムラ	6	16.3	2.9	0.407	26.9	3.97	52.7	3.71
3	ヒノデ	6	15.8	2.7	0.369	22.0	4.13	49.5	2.61
4	タケノサコ	6	15.5	3.6	0.349	22.6	7.14	50.0	1.01
5	ヤマグチ	6	15.3	3.1	0.373	26.6	6.25	56.3	2.44
6	クモトオシ	6	15.5	2.9	0.351	26.1	6.07	50.8	1.75
7	ヤイチ	6	15.5	2.8	0.369	31.2	6.45	53.0	1.88
8	ガリン	6	15.6	3.5	0.339	27.5	7.01	49.6	1.01
9	エダナガ	6	15.3	2.5	0.397	28.3	6.70	58.1	2.31
10	オオノ	6	15.6	2.7	0.381	26.0	5.57	51.5	1.97
11	アカバ	6	15.7	2.3	0.383	24.1	6.22	54.7	1.92
12	オピアカ	6	15.1	3.4	0.319	25.8	5.51	44.1	1.09
13	ヤブクグリ	6	15.6	3.0	0.389	22.6	2.97	47.7	4.10
14	メアサ	6	15.9	2.8	0.369	21.8	4.47	49.1	2.49
15	アヤスギ	6	15.5	3.2	0.329	23.9	4.68	43.7	1.68
16	ホンスギ	6	15.8	3.5	0.342	23.7	5.81	48.3	1.36
平均値			15.5	3.0	0.366	25.3	5.61	51.3	2.06
標準偏差			0.5	0.4	0.025	2.5	1.23	4.8	0.88
変動係数 (%)			3.0	13.4	6.9	10.1	21.9	9.4	43.0

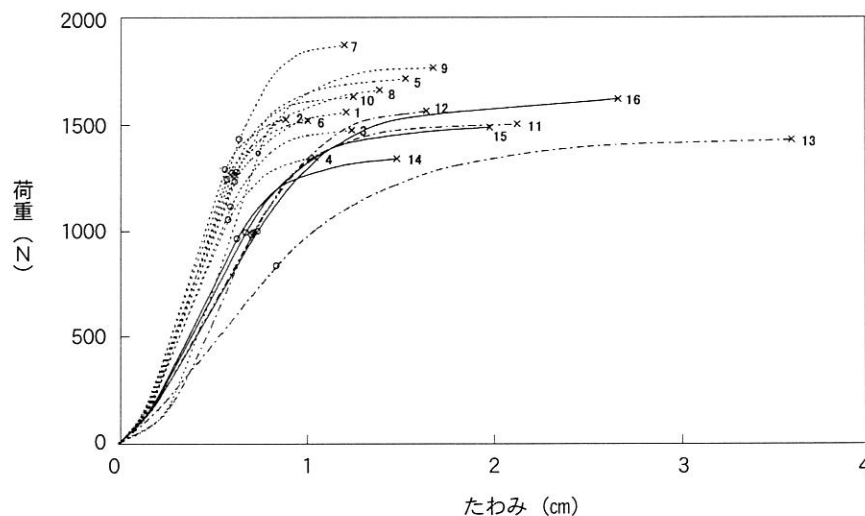


図-8 スギ在来16品種の荷重-たわみ線図

注：比例限度を○，破断点を×で示す。

3.2.7 縦圧縮試験と曲げ試験で得られた力学的性質

縦圧縮試験および曲げ試験から得られた木材性質を表-13に示す。各品種のそれぞれの力学的性質の最小値に対する最大値の比は、縦圧縮強さが1.4倍、曲げヤング率が2.5倍、曲げ強さが1.4倍、曲げ仕事量が4.2倍であり、曲げヤング率および曲げ仕事量における品種間差が極めて大きかった。縦圧縮強さ、曲げヤング率および曲げ強さの相互間に1%水準で有意な正の相関係数が認められた。気乾密度と縦圧縮強さおよび曲げ強さとの間には両者とも1%水準で有意な正の相関係数が認められたが、気乾密度と曲げヤ

ング率との間には有意な関係が存在しなかった。これは、平川ら（1995, 1996, 1997）⁷⁶⁻⁷⁸⁾の報告に示されるように、スギでは曲げヤング率が密度よりも仮道管二次壁中層のマイクロフィブリル傾角に強く影響されていることに起因すると考えられた。

曲げ試験における荷重-たわみ線図を図-8に示す。ナカムラやクモトオシなどの早生型の成長を示す品種は、曲げヤング率が大きく、塑性域に入ると直ちに脆性的に破壊した。一方、ヤブクグリやホンスギなどの中生型あるいは晩生型の成長を示す品種は、曲げヤング率が総じて小さく、低い応力状態を維持し極めて大きなたわみの後に破壊した。このような曲げ荷重に対する挙動の違いは、小田ら（1988）³⁴⁾の縦圧縮試験や佐々木ら（1983）⁴³⁾の実大曲げ試験の結果と数品種を除けばよく一致しており、スギ品種固有の木材性質であると推察された。

3.3 結論

スギ在来品種のそれぞれに特有な成長、木材性質とその個体内変動パターンおよびその品種間差を把握することを目的として、MuPS分析によるDNA鑑定で品種を同定した九州産スギ在来品種16品種を用いて実験を行った。その主な結果は以下のとおりであった。

- (1) MuPS分析によるDNA鑑定の結果、既存のMuPS型データベースと4品種が一致せず、3品種が同じMuPS型を呈し同一品種と考えられた。したがって、スギ品種の材質等の研究においては、事前にDNA情報に基づいた品種同定が必要である。
- (2) 実験に供した16品種の胸高直径、樹高および単木材積の成長量は、それぞれに品種特有の一般的な成長型を示した。
- (3) 心材、移行材および辺材の生材含水率は、各品種3個体間の値が極めて類似したが、品種間では大きく異ったことから、品種固有の性質であると推察された。
- (4) 心材の L^* 値および a^* 値に統計的な品種間差が認められた。 L^* 値と生材含水率との間に負の相関関係が認められた。
- (5) 容積密度は品種間で異なり、早生型の成長を示す品種に比べ中生型および晩生型の成長を示す品種の方が大きかった。
- (6) 丸太の動的ヤング率は品種で異なり、最大のクモトオシが最小のヤブクグリ約1.8倍であった。樹高方向の変動については、地上高が高くなるにつれ増加するパターンと1番丸太が低くそれより上部では1番丸太よりもやや高い値で比較的安定する2つのパターンが存在し、前者が中生型および晩生型の成長を示す品種、後者が早生型の成長を示す品種に認められた。
- (7) 縦圧縮強さ、曲げヤング率および曲げ強さの相互間に正の相関関係が認められた。無欠点小試験体の曲げ荷重に対する挙動は、品種あるいは成長型に起因する木材性質と推察された。

以上のように、スギ在来品種16品種は、それぞれに品種特有の一般的な成長を示し、木材性質では生材含水率、心材色、容積密度、丸太の動的ヤング率、力学的性質および曲げ荷重に対する挙動が各品種3個体間では極めて類似したが、品種間では大きく異った。

このことから、これらの木材性質は品種固有の性質であると推察され、用途に適した遺伝的形質をもつスギ在来品種によるクローン林業の可能性を示唆している。たとえば、一般建築用材を目的とする場合は、樹幹の通直性など従来の特性に加えて、強度性能に優れ、かつ乾燥性の良い心材の生材含水率の低い品種を選択することによって、加工や利用の場面で有利となる木材供給が可能となろう。

第4章 ヒノキ精英樹クローンの木材性質

本章では、第3章でスギ在来品種の成長と木材性質の検討を行ったと同様に、ヒノキ精英樹クローンの成長と丸太動的ヤング率、容積密度、生材含水率および材色を把握し、それらの樹幹内変動とクローン間差について検討した。

4.1 材料と方法

4.1.1 材料

大分県林業試験場天瀬試験地のヒノキ精英樹クローン集植所（1971年3月設定）に、植栽間隔が2.5mで1クローン当たり9本ずつ植栽されている33年生の県内産18クローンおよび県外産32クローンを対象とした。これらの精英樹クローンは、実生ヒノキに各クローンを接木した林木育種センター九州育種場の接木苗を用いており、平成4年に不良木を中心とした1クローン当たり1-5本の除伐が行われている。この試験地は、大分県日田郡天瀬町の海拔340mに位置し、年平均気温14℃、年降水量1900mm、土壌BlD型、方位N、傾斜5-10度の緩斜面である。

4.1.2 試験方法

平成15年4月に毎木調査を行い、胸高直径を測定した後、樹幹内変動およびクローン間差を調べるため、次の試験を行った。

[試験 I]

全クローンの平均値に近い胸高直径をもつ国東19号および大分7号の2クローンを対象にして、表-14に示すとおり、それぞれ肥大成長量の異なる3個体を供試材とし、樹幹内部位ごとの動的ヤング率、容積密度、生材含水率、材色について試験した。供試材を伐採後、地上高0.2mから2m毎に玉切り、縦振動法により測定した一次固有振動数と丸太密度を測定し、動的ヤング率を算出した。胸高部位及び地上高0.2mから2m毎に厚さ約3cmの円盤を採取し、髓を頂点とする扇形試料を切り出し、髓から5年輪毎に割った小ブロックの重量を測定した。容積密度は浮力法により、生材含水率は全乾法により測定した。また、1番丸太から3番丸太を厚さ3cmに製材し、屋内で5ヶ月間天然乾燥した。その後、プレーナー仕上げした地上高2.5m付近の柁目面の辺材2箇所と心材5箇所の材色をスガ試験機(株)製のカラーテスターを用いL*a*b*表色系で測定した。このとき、試料の平均含水率は17.2%であった。

表-14 国東19号と大分7号の供試木の概要

精英樹名	区分 (胸高直径)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	単木材積 (m ³)
国東19	大	26.5	16.0	0.391
	中	24.0	15.6	0.375
	小	20.0	16.7	0.268
大分7	大	25.5	18.2	0.459
	中	23.5	18.3	0.402
	小	20.5	17.5	0.294

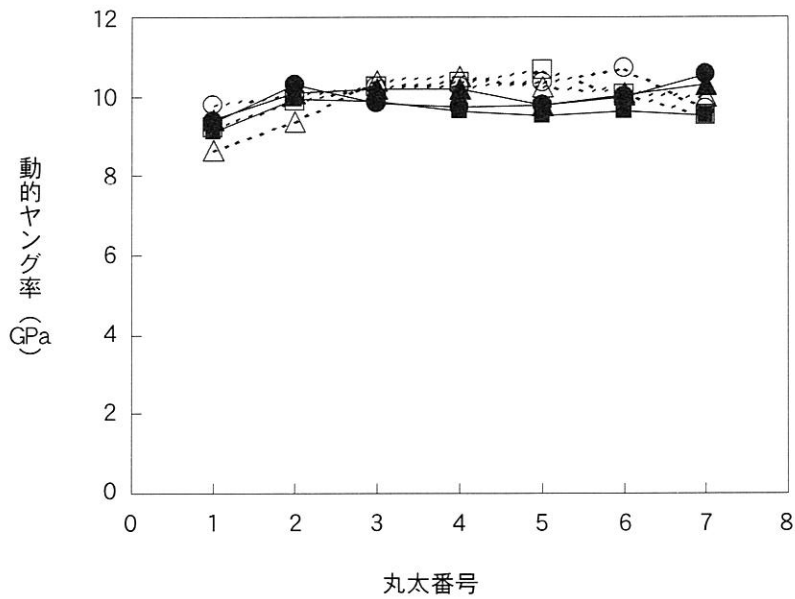


図-9 国東19号と大分7号の丸太動的ヤング率の樹高方向変動
 注：国東19の大；□，中；○，小；△，大分7の大；■，中；●，小；▲を表す。

[試験Ⅱ]

県内産18クローン（大分4，大分5，大分7，大分8，三重5，三重6，竹田7，竹田8，玖珠5，玖珠6，日出4，日出6，国東18，国東19，佐伯5，佐伯17，中津9，中津12）および県外産32クローン（嘉穂5，嘉穂6，浮羽14，甘木2，筑紫5，山田2，藤津8，諫早1，諫早3，神崎1，長崎1，長崎署1，唐津1，佐賀1，北諸県1，菊池1，小城1，阿蘇3，阿蘇4，阿蘇6，阿蘇7，西白杵1，東白杵1，南高来3，南高来8，始良4，始良5，始良11，始良12，始良39，始良47，始良53）を対象に，各クローンの胸高直径の平均木1個体を供試材として，試験Ⅰと同様に試験した。

4.2 結果と考察

4.2.1 丸太動的ヤング率の樹幹内変動

各クローンの個体毎の丸太番号別動的ヤング率を図-9に示す。丸太の動的ヤング率は，8.63-10.69GPaの範囲にあり，国東19号の平均値が10.00GPaで変動係数5.1%，同様に大分7号が9.85GPaで3.6%であった。

動的ヤング率の樹高方向の変動パターンは，地上高0.2-2.2mの1番丸太がいずれの個体も小さく，2番丸太から5番丸太までの平均値の0.86倍であった。また，国東19号の平均値の0.86倍であった。また，国東19号の5番丸太までは，丸太番号が大きくなるほど動的ヤング率が増大する傾向にあったが，大分7号は，2番丸太で増大した後に低下し，再び漸増する傾向にあった。国東19号にみられる樹高方向の変動パターンについては，丸太径と未成熟材率の関係（太田；1972）¹⁵⁾から推察できるが，大分7号を含む後述のいくつかのクローンが示した変動パターンについて，その理由は今のところ不明である。

次に，クローン，胸高直径，丸太番号を要因とし，分散分析による有意差の検定を行った。表-15に示すように，クローンおよび胸高直径の大と中との間に5%有意，1番丸太とそれより上部の丸太との間に1%水準で有意な差が認められた。

表-15 動的ヤング率の分散分析結果と最小有意差法による比較

要因	DSS	df	MS	Fv	Pv	D
クローン (A)	0.2535	1	0.2535	5.5355	0.0365	*
成長区分 (B)	0.4297	2	0.2149	4.6928	0.0312	*
丸太番号 (C)	3.4068	6	0.5678	12.4009	0.0002	**
A × B	0.4454	2	0.2227	4.8639	0.0284	*
A × C	1.7400	6	0.2900	6.3337	0.0034	**
B × C	1.0882	12	0.0907	1.9805	0.1254	ns
誤差	0.5494	12	0.0458			
全体	7.9130	41				

比較の結果	A	国東>大分7
	B	大<中≒小
	C	1番玉<<2番玉≒3番玉≒4番玉≒5番玉≒6番玉≒7番玉

注：DSS；偏差平方和，df；自由度，MS；平均平方，Fv；F値，Pv；P値，D；判定，**；1%水準で有意差あり，*；5%水準で有意差あり，ns；有意差なし，<<；1%水準で有意差あり，<；5%水準で有意差あり，≒；有意差なしを表す。

4.2.2 容積密度の樹幹内変動

各地上高における円盤の平均容積密度は、図-10に示すとおり、地上高0.2mから1.2mにかけ低下し、多少のバラツキは認められるものの、その後は地上高の増大に伴い著しく増大する傾向にあった。円盤の平均容積密度から推定した丸太の容積密度と動的ヤング率との間に有意な相関関係が認められなかったことから、この傾向は動的ヤング率の樹高方向の変動と必ずしも一致していなかった。

次に、地上高1.2mおよび4.2mの放射方向における各クローン3個体の平均容積密度は、図-11に示すように、髓付近で大きく、その後顕著な低下を示し、11-15年輪にあたる第3ブロック付近で最小値をとり、その後漸増する傾向にあった。また、地上高1.2mの容積密度は、地上高4.2mのそれに比べ、第3ブロック付近まで小さいが、第4ブロック以降はほぼ同様の値であった。

さらに、図-12に示すように、地上高1.2mおよび4.2mの円周方向における各クローン3個体の容積密度の平均値は、変動係数が1.3-2.6%であり、バラツキが小さかった。地上高1.2mにおいて、クローン、胸高直径、円周方向の部位を因子とした分散分析の結果は、表-16に示すとおり、クローン間で1%水準の有意な差が認められたが、胸高直径の異なる個体間および円周方向の扇形試料間の差は認められなかった。地上高4.2mにおいても同様に分散分析を行ったが、いずれの因子間にも有意な差は認められなかった。

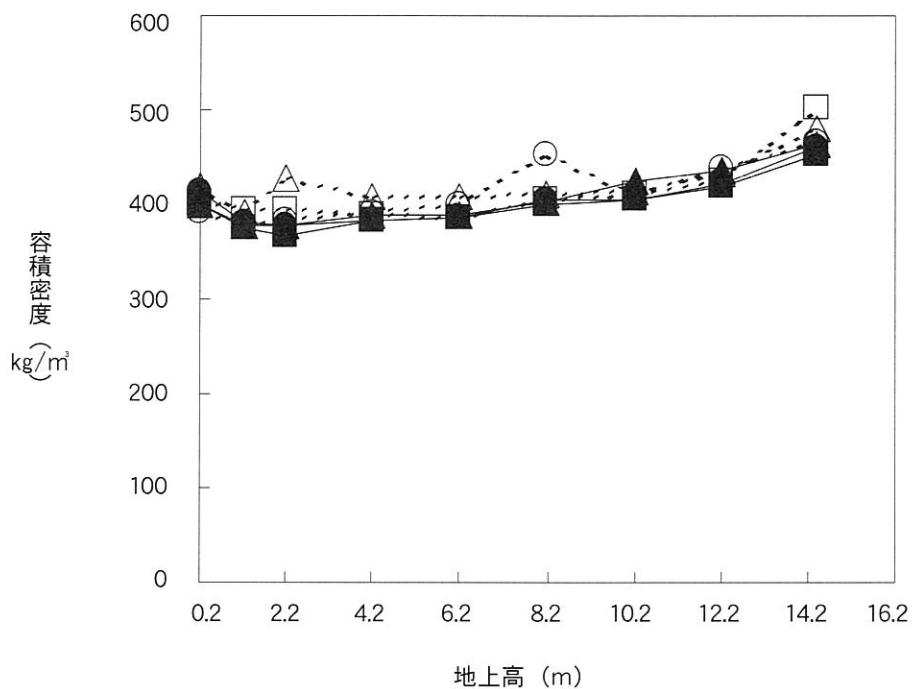


図-10 国東19号と大分7号の容積密度の樹高方向変動

注：国東19の大；□，中；○，小；△，大分7の大；■，中；●，小；▲を表す。

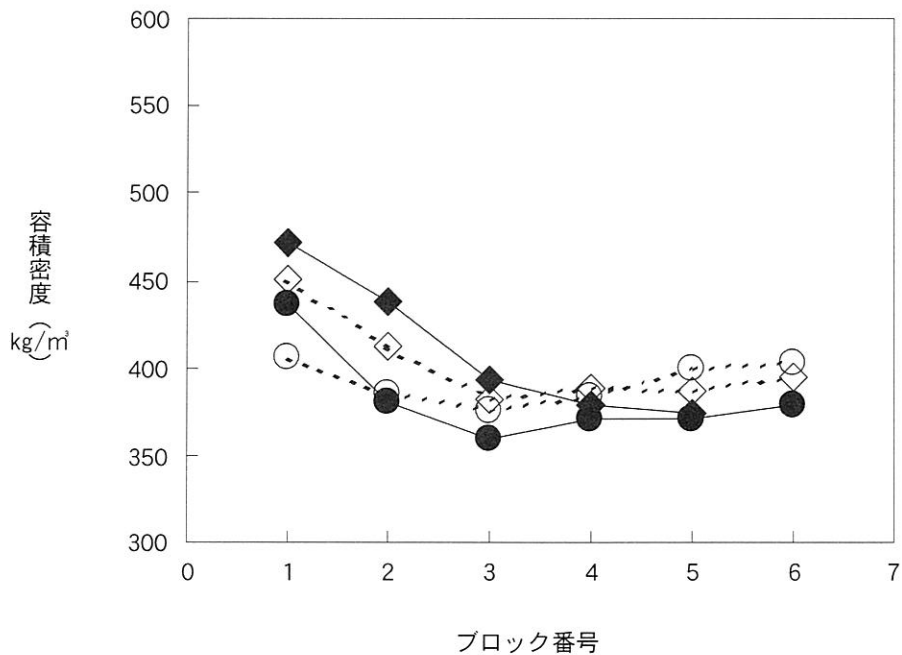


図-11 国東19号と大分7号の容積密度の放射方向変動

注：国東19の地上高1.2m；○，4.2m；◇，大分7の地上高1.2m；●，4.2m；◆を表す。
 ブロック番号 1；扇形試験片の髓から1-5年輪，2；6-10年輪，3；11-15年輪，4；
 16-20年輪，5；21-25年輪，6；26-最外年輪を表す。

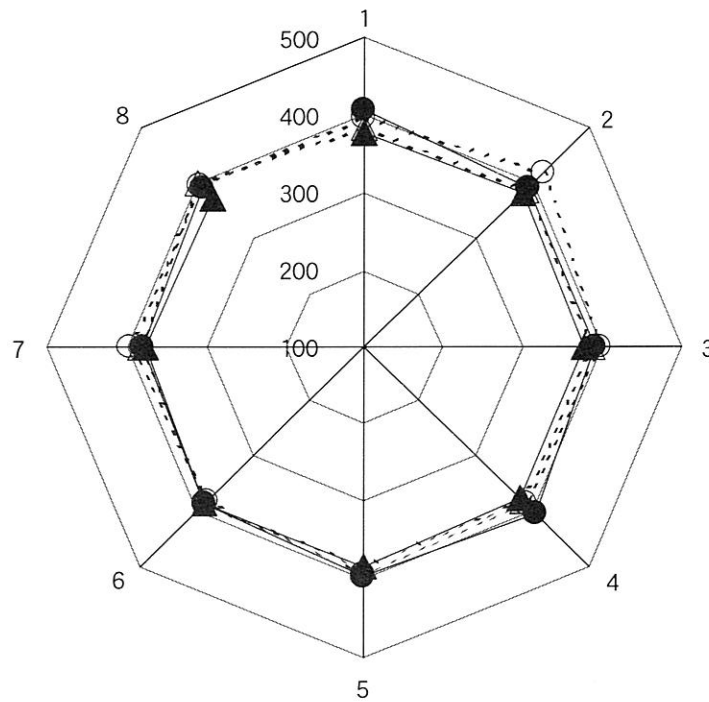


図-12 国東19号と大分7号の容積密度の円周方向変動

注：国東19の地上高1.2m；●，4.2m；○，大分7の地上高1.2m；▲，4.2m；△を表す。

表-16 胸高部位における容積密度の分散分析結果と最小有意差法による比較

要因	DSS	df	MS	Fv	Pv	D
クローン (A)	2399.84	1	2399.84	27.386	0.0001	**
成長区分 (B)	525.69	2	262.85	2.999	0.0824	ns
方 向 (C)	963.22	7	137.60	1.570	0.2235	ns
A × B	1315.13	2	657.56	7.504	0.0061	**
A × C	1462.07	7	208.87	2.383	0.0790	ns
B × C	3318.48	14	237.03	2.705	0.0364	*
誤 差	1226.84	14	87.63			
全 体	11211.28	47				
比較の結果	A 国東19≫大分7					
	B ns					
	C ns					

注：DSS；偏差平方和，df；自由度，MS；平均平方，Fv；F値，Pv；P値，D；判定，**；1%水準で有意差あり，*；5%水準で有意差あり，ns；有意差なし，<<；1%水準で有意差ありを表す。

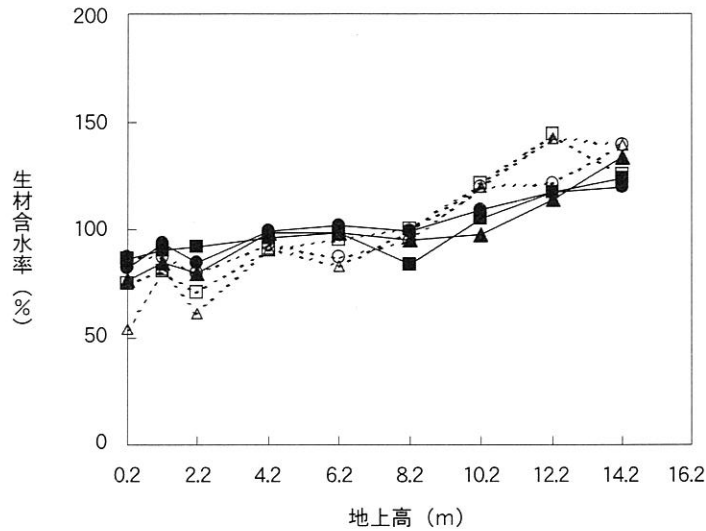


図-13 国東19号と大分7号の木材含水率の樹高方向変動
 注：国東19の大；□，中；○，小；△，大分7の大；■，中；●，小；▲を表す。

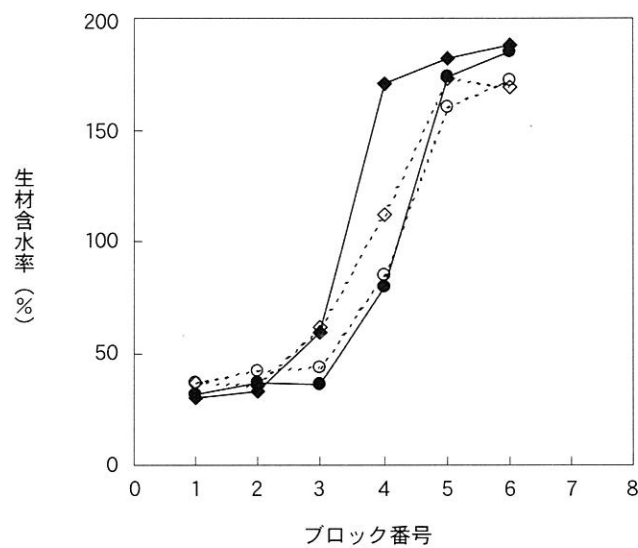


図-14 国東19号と大分7号の木材含水率の放射方向変動
 注：国東19の地上高1.2m；○，4.2m；◇，大分7の地上高1.2m；●，4.2m；◆を表す。

4.2.3 木材含水率の樹幹内変動

各地上高における円盤の木材含水率は、図-13に示すとおり、地上高が高いほど大きい傾向にあった。地上高1.2mおよび4.2mにおける放射方向の木材含水率は、図-14に示すように、心材部の平均値が34%と低く、辺材部のそれが175%と高い傾向にあった。また、円盤を8分割した扇形試料の木材含水率の測定結果によると、その変動係数は6.1-7.8%であった。このことにより、円周方向のバラツキは小さいと推察された。国東19号の木材含水率は、地上高8.2mより下部では大分7号のそれより小さく、それより上部では高い傾向にあった。この原因として、心材率や樹冠量の影響も考えられるが、国東19号および大分7号の胸高直径と樹高がいずれも全クローンの平均値に近く、心材率や樹冠量も類似していることから、他の何らかの理由によるものと推察された。

表-17 国東19号と大分7号の地上高1.2m, 2.5mおよび4.5mにおける辺材色と心材色

地上高	国 東 19						大 分 7					
	辺 材			心 材			辺 材			心 材		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1.2m	84.3	0.8	20.5	79.6	6.1	22.8	82.3	1.9	22.0	80.3	5.5	23.6
2.5m	81.6	-0.2	20.9	81.2	3.9	22.1	82.4	0.6	20.1	80.8	4.0	23.7
4.5m	85.1	-2.1	21.7	80.8	2.9	24.9	83.8	-0.2	21.4	81.7	3.6	23.0

表-18 心材a*値の分散分析結果と最小有意差法による比較

要因	DSS	df	MS	Fv	Pv	D
クローン (A)	0.215	1	0.2151	0.1071	0.7444	ns
成長区分 (B)	16.513	2	8.2564	4.1120	0.0204	*
地上高 (C)	106.828	2	53.4141	26.6021	0.0000	**
A × B	0.737	2	0.3684	0.1835	0.8327	ns
A × C	6.544	2	3.2721	1.6296	0.2031	ns
B × C	27.953	4	6.9883	3.4804	0.0118	*
A × B × C	26.764	4	6.6909	3.3323	0.0146	*
誤差	144.568	72	2.0079			
全 体	330.122	89				

比較の結果	A	ns
	B	中<小≒大
	C	1.2m≫2.5m≒4.5m

注：DSS；偏差平方和，df；自由度，MS；平均平方，Fv；F値，Pv；P値，D；判定，**；1%水準で有意差あり，*；5%水準で有意差あり，ns；有意差なし，<<；1%水準で有意差あり，<；5%水準で有意差あり，≒；有意差なしを表す。

4.2.4 材色の樹幹内変動

一般に、材色は、色相、明度及び彩度という色の3属性で表され、マンセル体系やXYZ表色系あるいはL*a*b*表色系で表示される。ヒノキの材色は、その心材色に特徴があり、赤みの強い心材色が高く評価されている現状にあることから、心材の赤色系の評価に適したL*a*b*表色系で検討した。

辺心材および樹高別のL*値、a*値、b*値の平均値を表-17に示す。次に、赤みの指標として心材のa*値を用い、クローン、胸高直径、地上高部位を因子とした分散分析を行った。その結果、表-18に示すとおり、地上高の間に1%水準の有意な差が認められた。すなわち、地上高1.2mの材色は、地上高2.5mおよび4.5mより赤みが強いことが示唆された。

表-19 ヒノキ精英樹50クローンの丸太動的ヤング率

	丸太番号									平均値 (1-5)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
試料数	50	50	50	50	50	49	45	26	5	50
最小値 (Gpa)	6.10	6.41	6.96	7.11	7.26	6.73	4.92	5.76	6.55	6.87
平均値 (Gpa)	8.50	9.13	9.09	9.03	8.94	8.82	8.42	7.30	6.90	8.94
最大値 (Gpa)	10.44	11.02	10.94	11.04	11.17	10.86	11.27	9.65	7.81	10.85
標準偏差 (Gpa)	1.04	1.01	0.95	0.87	0.87	0.95	1.40	1.01	0.52	0.85
変動係数 (%)	12.2	11.1	10.5	9.6	9.7	10.8	16.7	13.8	7.5	9.5

表-20 ヒノキ精英樹50クローンの胸高部位における容積密度

	髓からの年輪番号							円盤平均
	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-	
試料数	50	50	50	50	50	49	2	50
最小値 (kg/m ³)	353	304	289	306	311	301	403	308
平均値 (kg/m ³)	429	379	352	357	376	372	423	373
最大値 (kg/m ³)	567	443	417	413	511	442	444	428
標準偏差 (kg/m ³)	38.3	28.6	26.7	26.4	34.8	30.9	29.1	24.7
変動係数 (%)	8.9	7.5	7.6	7.4	9.3	8.3	6.9	6.6

4.2.5 精英樹クローンの丸太動的ヤング率

全クローンの丸太の動的ヤング率を表-19に示す。丸太の平均動的ヤング率は、既報値（池田；2001，池淵ら；2000，大森ら；1993）^{13,14,17)} に比べやや小さかった。動的ヤング率の樹高方向変動は、1番丸太が8.50GPaと小さく、2番丸太がそれより7.4%高い9.13GPaの最大値となり、3番丸太以降は漸減し、6番丸太以降で著しく低下する傾向にあった。このような傾向は、スギの低い地上高部位の動的ヤング率が小さいことと似ており、また地上高の高い部位では丸太径が小さくなり、動的ヤング率の小さい未成熟材の割合が大きくなるためと推察された。

各丸太番号の動的ヤング率について分散分析を行った結果、1番丸太と2-5番の各丸太との間に1%水準で有意な差が認められたが、2-5番の各丸太間には差が認められなかった。また、動的ヤング率のクローン間の変動係数は10%前後であり、比較的安定した1番丸太から5番丸太の値をクローン間差の検討に用いることにした。

表-21 ヒノキ精英樹50クローンの胸高部位における生材含水率

	髄からの年輪番号							円盤平均
	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-	
試料数	50	50	50	50	50	49	2	50
最小値 (%)	27.7	32.5	33.0	34.4	48.9	117.3	154.0	58.5
平均値 (%)	34.7	39.1	41.6	91.9	168.4	193.2	165.5	90.6
最大値 (%)	47.1	53.1	97.1	216.9	230.8	254.8	177.0	122.5
標準偏差 (%)	4.5	5.4	10.8	47.8	39.3	24.8	16.3	12.9
変動係数 (%)	12.9	13.9	25.8	52.0	23.3	12.9	9.8	14.2

表-22 L*a*b*表色系によるヒノキ精英樹50クローンの辺材色と心材色

	辺材			心材		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
試料数	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
最小値	79.3	-2.5	18.1	74.4	1.6	20.1
平均値	82.5	-0.3	21.0	80.3	4.0	23.5
最大値	87.3	5.3	25.2	83.1	9.1	27.6
標準偏差	1.8	1.8	1.5	1.7	1.7	1.5
範囲	8.1	7.8	7.1	8.7	7.4	7.5

4.2.6 精英樹クローンの容積密度

全クローンの胸高部位の容積密度を表-20に示す。全クローンの平均値は、1-5年輪の第1ブロックが428kg/m³の最大値を示し、11-15年輪の第3ブロックではその82%にあたる352kg/m³まで低下し、その後再び漸増する傾向にあった。このような放射方向の容積密度の変動パターンは、いずれのクローンにおいても同様に認められた。このことは、各ブロックの変動係数が7.4-9.3%の狭い範囲にあったことから推察された。また、胸高部位の円盤の容積密度は、308-428kg/km³の範囲にあり、変動係数が6.6%と小さく、古賀ら(1992)¹⁹⁾の報告にある値に近似した。なお、クローン間差の検討は、胸高部位の円盤の容積密度を用いた。

4.2.7 精英樹クローンの生材含水率

全クローンの胸高部位の生材含水率を表-21に示す。第1ブロックから第2ブロックにかけては、全て心材であり、含水率が28-53%と低く狭い範囲にあった。第3ブロックから第5ブロックにかけては心材および移行材、辺材が混在していたため、含水率の範囲が広く、変動係数が大きかった。第6ブロックから第7ブロックは全て辺材であり、含水率が117-255%と高かった。一方、扇形試料から推測した円盤の含水率は、59-123%と比較的広い範囲を示した。

一般に、ヒノキの心材と辺材との境界はスギのように明瞭でなく(湊ら;1989)²¹⁾、また地上高の低い部位では年輪の褶曲が大きいいため、移行材部が広範囲に存在する。また、スギで報告されているような高含水率の心材を持つクローンあるいは個体は存在しなかった。

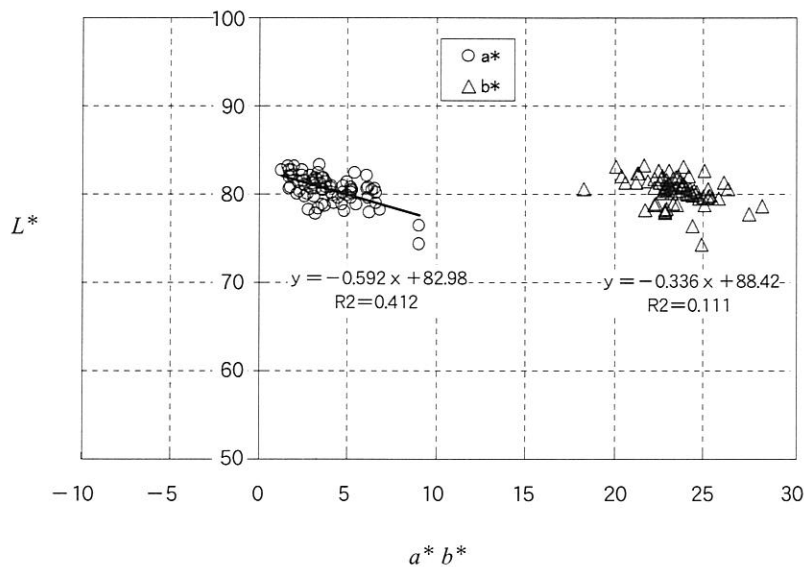


図-15 $L^*a^*b^*$ 表色系におけるヒノキ心材の各色指数の関係

4.2.8 精英樹クローンの材色

全クローンの辺材と心材の L^* 値, a^* 値, b^* 値を表-22に示す。いずれの値においても, 最大値と最小値の差が7.1-8.7の狭い範囲にあった。心材の L^* 値は辺材に比べやや小さく, 逆に a^* 値と b^* 値はやや大きい傾向にあった。

次に, $L^*a^*b^*$ 表色系における各指数間には, 図-15に示すように, 心材の L^* 値と a^* 値及び b^* 値との間に1%水準の有意な相関関係が認められた。また, 辺材においても a^* 値と1%水準, b^* 値と5%水準の有意な相関関係が認められた。このことから, クローン間の材色差を検討する指数として, いずれの指数でも可能であることが示唆されたが, 赤色系の評価に適した a^* 値を用いるのが妥当である。

4.2.9 成長と木材性質のクローン偏差

さて, 動的ヤング率, 容積密度, 材色 (a^* 値), 胸高直径, 曲特性, 枝特性の6つの主な特性値の偏差を図-16に示した。いずれの特性値においても図の左側にあるクローンの方が一般建築用材として優っていると考えられるが, 本研究ではこれらの特性値の全てに満足できるクローンは存在しなかった。

4.2.10 主成分分析による優良クローンの検討

ヒノキ精英樹50クローンの成長量, 幹や枝の形態特性および材質特性のデータを用いて, 主成分分析による優良クローンの検討を行った。使用した変量は, 成長量が各クローンの平均胸高直径および平均樹高の2変量, 形態特性として幹曲りおよび根曲りの曲り特性(無0→3大)と枝径および枝長, 枝密度の枝特性(小1→5大)の2特性5変量とし, 材質特性が動的ヤング率および容積密度, 生材含水率, 心材色の4変量とした。なお, 形態特性の2特性5変量は諫本(1998)¹¹⁾の報告にある23年生時のデータを用いた。

まず, これら11の変量間における関連を相関関係により検討した。その結果, 胸高直径と樹高, 幹曲りと根曲り, 枝径と枝長, 動的ヤング率と容積密度の間に1%水準の有意な正の相関が認められた。主成分分析を行う際に, 主成分変数が多くなると個々の変数の寄与率が小さくなるとともに, 因子である変量

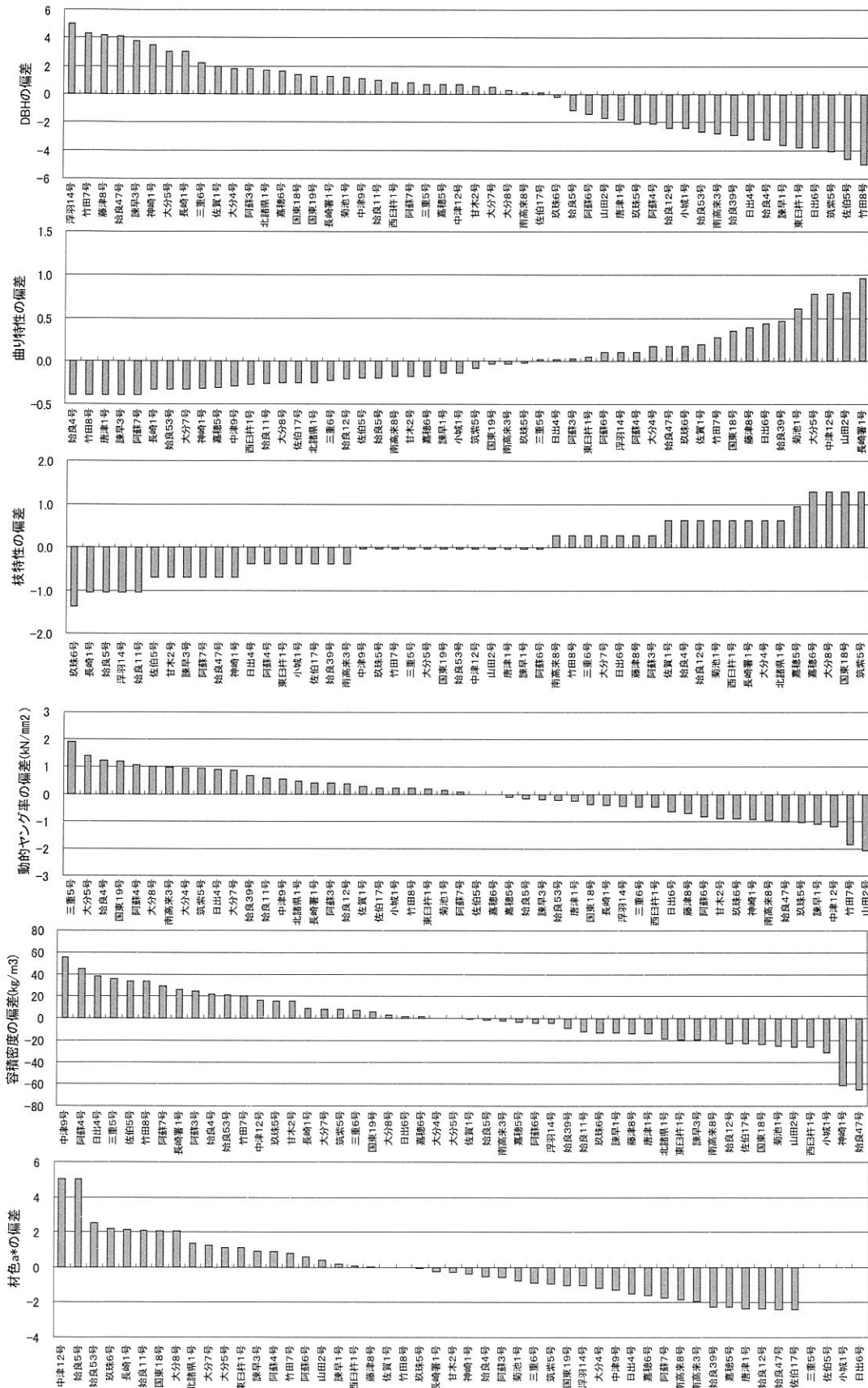


図-16 ヒノキ精英樹クローンの成長特性と材質特性のクローン間偏差

表-23 主成分分析に用いた変量の概要

因子	胸高直径 (cm)	曲り特性	枝特性	容積密度 (kg/m ³)	動的ヤング率 (GPa)	心材 a^*
最小値	17.60	0.00	2.33	307.6	6.87	1.6
平均値	22.59	0.39	3.71	372.8	8.94	4.1
最大値	27.60	1.36	5.00	428.3	10.85	9.1
標準偏差	2.61	0.35	0.66	24.7	0.85	1.8
変動係数 (%)	11.57	89.40	17.86	6.6	9.53	44.1

注：曲り特性は幹曲がりと根曲りの平均値，枝特性は枝径，枝長，枝密度の平均値，容積密度は樹幹の平均値である。

交互の関係が複雑になることから，クローン間で差異が認められない変量の削除と関連性の高い変量の統合を行った。そこで，クローン間で差異が認められない樹高と生材含水率の2変量を削除し，曲り特性と枝特性については平均値を用いることにした。その結果，表-23に示した6つの変量を得た。この6つの変量間では，動的ヤング率と容積密度の間に1%水準で有意な相関が認められるだけであり，全体的に関連性は低く，各変量の独立性がうかがえた。

次に，これらの変量を用いて行った主成分分析の結果を表-24に示す。第1主成分は，28.9%の寄与率を示し，動的ヤング率，容積密度，胸高直径が主な変量である。したがって，動的ヤング率や容積密度が大きい反面，成長が劣るといふ主成分を意味している。第2主成分は，寄与率が19.8%であり，材色(a^* 値)と容積密度が主な変量となっている。心材色の赤みの強さを示している。同様に，第3主成分が曲りや枝の大きさを，第4主成分が成長の良さを示していると考えられる。この結果をみると，動的ヤング率や容積密度といった材質特性の方が，成長量および幹や枝の形態特性に比較して，クローン特性に強く影響していることが推察された。

ここで，各クローンのスコアを求め，第1主成分と第2主成分の散布図を図-17に示した。動的ヤング率と容積密度の大きいクローンがX軸の正の方向に，心材色の濃いクローンがY軸の正の方向に収束していることから，強度性能に優り心材色の濃いグループをA，強度性能に優るが心材色は普通のグループをB，強度性能は劣るが心材色の良いグループをCとした。同様に，図-18に示した第3主成分と第4主成分の散布図から，曲りや枝が小さく成長良好なグループをD，曲りや枝は大きい成長良好なグループをEとした。これらのクローン名を表-25に示した。

以上のグループ化は，材質特性を成長量および幹や枝の形態特性よりも優先させたものであり，23年生時に再選抜されたクローンと大半が異なってしまう結果であった。

表-24 主成分と因子負荷量

変数	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分	第5主成分
固有値	1.734	1.187	1.090	0.780	0.661
寄与率(%)	28.9	19.8	18.2	13.0	11.0
累積寄与率(%)	28.9	48.7	66.9	79.9	90.9
胸高直径	-0.613	-0.233	0.151	0.710	0.167
曲り特性	-0.360	0.140	0.800	-0.081	-0.437
枝特性	0.439	-0.398	0.619	-0.179	0.449
容積密度	0.605	0.563	0.105	0.270	-0.162
動的ヤング率	0.762	-0.024	0.114	0.403	-0.021
心材 a*	-0.299	0.799	0.142	-0.046	0.462

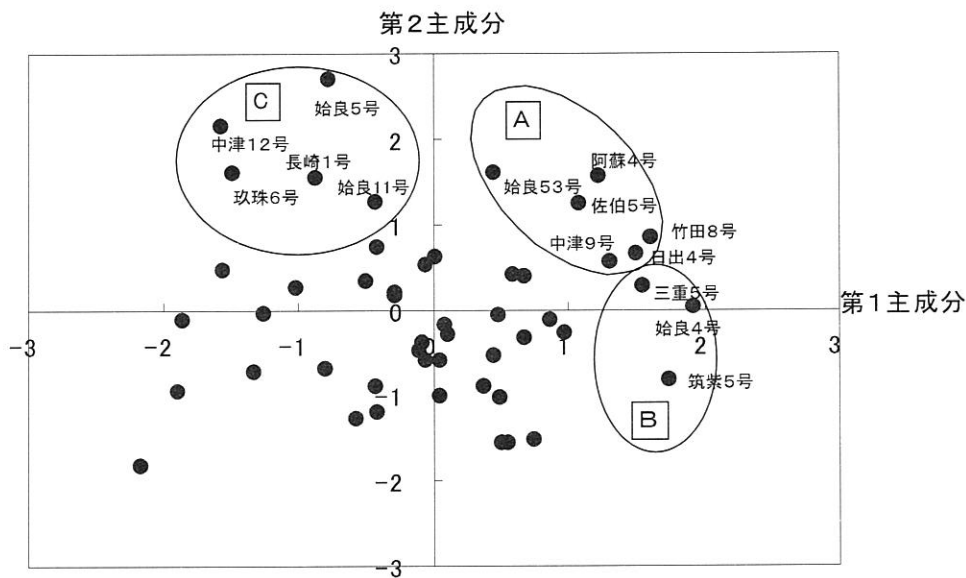


図-17 第1主成分と第2主成分のスコア-散布図

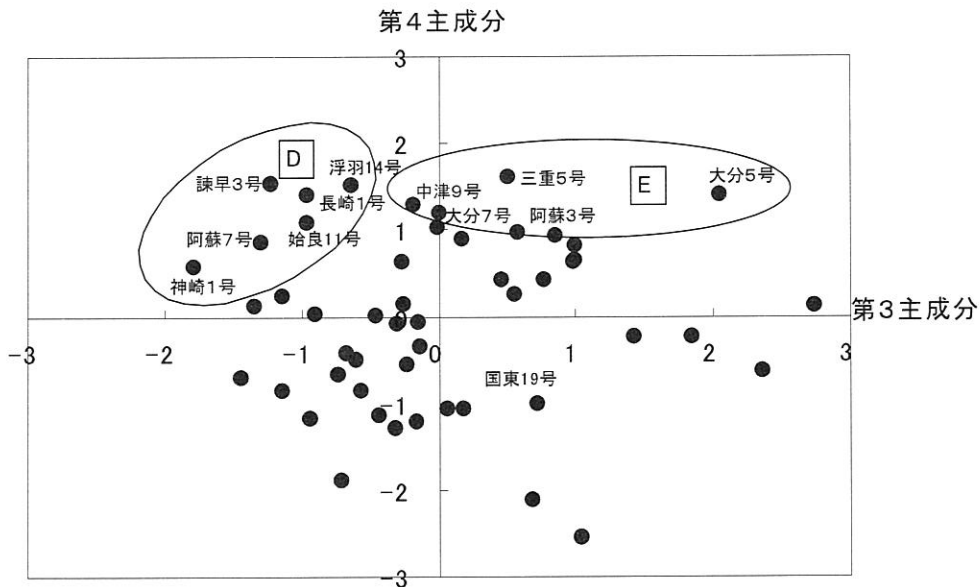


図-18 第3主成分と第4主成分のスコア-散布図

表-25 材質特性を考慮したときの優良ヒノキ精英樹クローン

グループ名	クローン名
A	阿蘇4, 佐伯5, 竹田8, 日出4, 中津9, 始良53
B	始良4, 三重5, 筑紫5
C	始良5, 中津12, 長崎1, 玖珠6, 始良11
D	諫早3, 長崎1, 始良11, 阿蘇7, 浮羽14, 神崎1
E	中津9, 大分7, 三重5, 阿蘇3, 大分5

4.3 結論

ヒノキ精英樹クローン集植所に植栽された33年生のヒノキ精英樹50クローンを対象として、丸太の動的ヤング率、容積密度、生材含水率、材色の樹幹内変動とクローン間差について検討した。主な結果は、次のとおりであった。

- (1) 動的ヤング率は、1番丸太で低く、2番丸太で最大値となり、それより上部で漸減する傾向にあった。1番丸太と2-5番丸太との間に1%水準で有意な差が認められた。しかし、異なった樹高方向の変動パターンを持つクローンあるいは個体も存在した。
- (2) 容積密度の放射方向の変動は、樹心近くで大きく、11-15年輪のブロックで最小となり、その後漸増する傾向にあった。樹高方向の変動は、地上高1.2-2.2m付近で最も小さく、地上高が増すにつれ増大する傾向にあった。
- (3) 心材の生材含水率は、個体間のバラツキが小さく、平均値が34%であった。
- (4) $L^*a^*b^*$ 表色系による地上高1.2mの心材色は、地上高2.5mおよび4.5mに比べ赤みが強かった。
- (5) 主成分分析により優良クローンの検討を行った結果、成長量および幹や枝の形態特性に比べ、丸太の動的ヤング率および容積密度に関係する主成分の寄与率が大きかった。また、各クローンのスコア-散布図から5つのグループ化が可能となった。

以上のことから、前章のスギ在来品種で述べたと同様に、ヒノキ精英樹クローンにおいても木材性質の値とその個体内変動パターンにクローンの遺伝性に起因すると考えられる差異が認められた。

第5章 スギ品種の成長と木材性質へ及ぼす植栽密度の影響

第2章から第4章までは、遺伝的要因がスギおよびヒノキの成長と木材性質に及ぼす影響について検討したが、本章からは森林施業を含む立地・環境要因の影響について検討する。

本章では、同一林分内の3段階の植栽密度で生育したスギ在来6品種を対象として、成長と木材性質の植栽密度間差および品種間差について検討した。

5.1 材料と方法

5.1.1 材料

大分県玖珠郡九重町の地蔵原スギ品種試験地（1976年3月設定，28年生，面積11.72ha）内に，植栽密度が成長に及ぼす影響を品種別に明らかにすることを目的に設定されたスギ品種別・植栽密度別比較試験林（面積0.8ha）から材料を得た。本試験林には，図-19に示すように，実生スギとスギ在来品種9品種が1ヘクタール当たり1500本，3000本，5000本の3段階の異なる密度（以後，1500本区，3000本区，5000本区という。）で植栽されている。なお，本試験林は，標高930mの北向き緩斜面に位置し，20年生時に地上高4mまでの枝打ちが実施されており，間伐は一度も実行されていない。

実験に先立ち，植栽品種のMuPS（Multiplex PCR of SCAR markers）分析を行い，MuPS型データベース（久枝ら；2003）^{32）}と照合し，品種を同定した。MuPS分析は，分析結果をMuPS型として19桁の2進法で表記する方法である。また，MuPS型データベースは，九州内にある在来品種の産地の公的研究機関によって指定・保存されている品種基準木から得られたMuPS型に関する情報からなる。本研究では，サンブ，アヤスギ，メアサの3品種のMuPS型が既存のデータベースのMuPS型と一致しなかった。そこで，これら3品種と検定不能の実生スギを除くイワオ，ヒノデ，ヤマグチ，ヤイチ，シャカイン，ヤブクグリの6品種を研究対象とした。なお，イワオ，ヒノデ，ヤマグチ，ヤイチは早生型の成長を示す品種（以後，早生品種），シャカイン，ヤブクグリは中生型の成長を示す品種（以後，中生品種という。）とされている（宮島；1989）^{1）}。

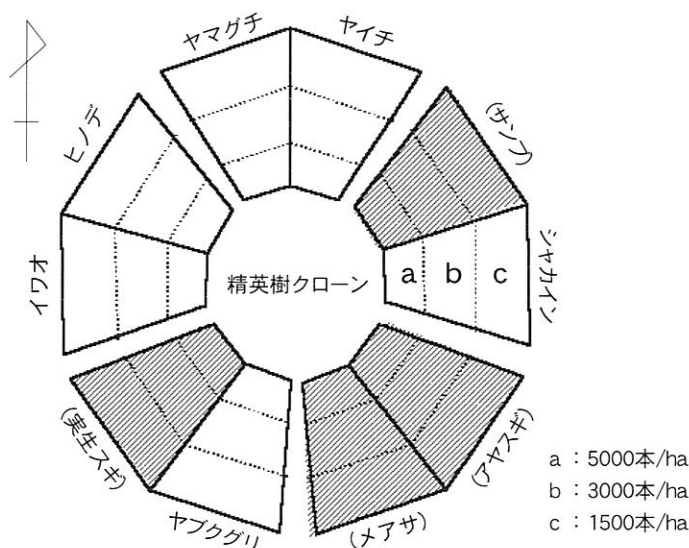


図-19 スギ品種・植栽密度比較試験林の配置

注：試験林は，実生スギとスギ在来9品種が蜘蛛の巣状に配置されている。DNA分析の結果，MuPS型データベースと一致しなかった3品種と実生スギを除いた6品種を実験に用いた。

5.1.2 試験方法

2003年12月に毎木調査により胸高直径を測定した後、隣接区の影響を排除するため各試験区の中心に近い位置から、それぞれの平均胸高直径に近い3個体を供試木として選び伐倒した。各供試木を地上高0.2m部位から上方へ約3cmの末口径まで2mごとに玉切り、地際を1番丸太とし順次番号を付けた。皮付き丸太の密度およびFFTアナライザー（リオン株製シグナルアナライザーSA-77）で縦振動法により一次固有振動数を測定し、動的ヤング率を算出した。その後、胸高および地上高0.2m部位から上方へ4mごとに厚さ約4cmの円盤を2枚ずつ採取し、ポリエチレン袋に密封して持ち帰った。直ちに2枚のうち1枚目の円盤から髓を中心とする扇形試料を切り出した後、髓から5年輪ごとの小ブロックに割り、容積密度と生材含水率を測定した。なお、生材含水率は、目視による材色の違いから心材、移行材および辺材に再分割し測定した。2枚目の円盤は、髓を通る長径方向とその直角方向の4方向の年輪数と年輪幅を測定し、樹幹解析を行った。

次に、地上高1.2-2.2m部位から、髓を通る厚さ30mmの柾目板を切り出し、天然乾燥させた後、厚さ25mmにプレーナー加工し、柾目面の材色をカラーテスタ（スガ試験機株製H-CT、スポット径5mm）を用いL*a*b*表色系で測定した。

さらに、材色測定に用いた柾目板の髓から15年輪目付近から無欠点の縦圧縮試験片（25×25×75mm）および曲げ試験片（25×25×400mm）を切り出し、島津製作所製AG10Tを用い縦圧縮試験および曲げ試験を行った。試験条件はJIS Z 2101に準じ、縦圧縮試験は荷重速度1mm/分、曲げ試験はスパン350mmで荷重速度5mm/分の柾目面荷重とした。試験時の試験体の含水率は17.5±0.5%であった。

5.2 結果と考察

5.2.1 毎木調査と樹幹解析による成長特性

各品種の植栽密度区ごとの残存率、平均胸高直径、平均樹高および樹幹解析から得られた平均単木材積を表-26に示す。一般に、植栽密度が高いほど林分閉鎖が早くなり、立木相互間の競争が激しくなり枯死木の割合が増える（佐藤；1983）⁷⁹⁾。本研究においても、全品種の植栽密度区ごとの残存率は、1500本区が86%、3000本区が77%、5000本区が61%であり、植栽密度の高い試験区ほど枯死木の割合が高かった。品種別には、ヤブクグリが全ての植栽密度区において最も高い残存率を示し、植栽密度の高い5000本区では早生品種のイワオ、ヒノデ、ヤマグチ、ヤイチに比べ中性品種のシャカイン、ヤブクグリが高い傾向にあった。

表-26 スギ6品種の各植栽密度における残存率、胸高直径、樹高および単木材積

品種名	立木残存率 (%)				胸高直径 (cm)				樹高 (m)				単木材積 (m ³)			
	1500	3000	5000	平均	1500	3000	5000	平均	1500	3000	5000	平均	1500	3000	5000	平均
イワオ	98.1	75.8	46.5	73.5	23.7	22.2	21.5	22.5	15.8	16.2	16.8	16.3	0.291	0.242	0.202	0.245
ヒノデ	74.1	79.0	58.1	70.4	28.7	22.5	22.0	24.4	15.2	15.1	15.8	15.4	0.374	0.248	0.221	0.281
ヤマグチ	88.9	74.2	55.8	73.0	26.5	22.2	21.3	23.3	15.5	15.7	15.3	15.5	0.307	0.212	0.200	0.240
ヤイチ	90.7	58.1	55.8	68.2	27.0	25.0	25.8	25.9	19.4	18.8	18.1	18.8	0.418	0.350	0.312	0.360
シャカイン	70.4	79.0	67.4	72.3	21.3	17.6	16.3	18.4	15.7	15.6	15.6	15.6	0.244	0.166	0.139	0.183
ヤブクグリ	92.6	96.8	79.1	89.5	20.2	17.7	16.9	18.3	12.9	12.8	13.2	13.0	0.170	0.131	0.125	0.142
平均値	85.8	77.2	60.5	74.5	24.6	21.2	20.6	22.1	15.8	15.7	15.8	15.8	0.301	0.225	0.200	0.242

注：立木残存率と胸高直径は各試験区の全立木の値、樹高と単木材積は各試験区の平均木3個体の平均値を表す。

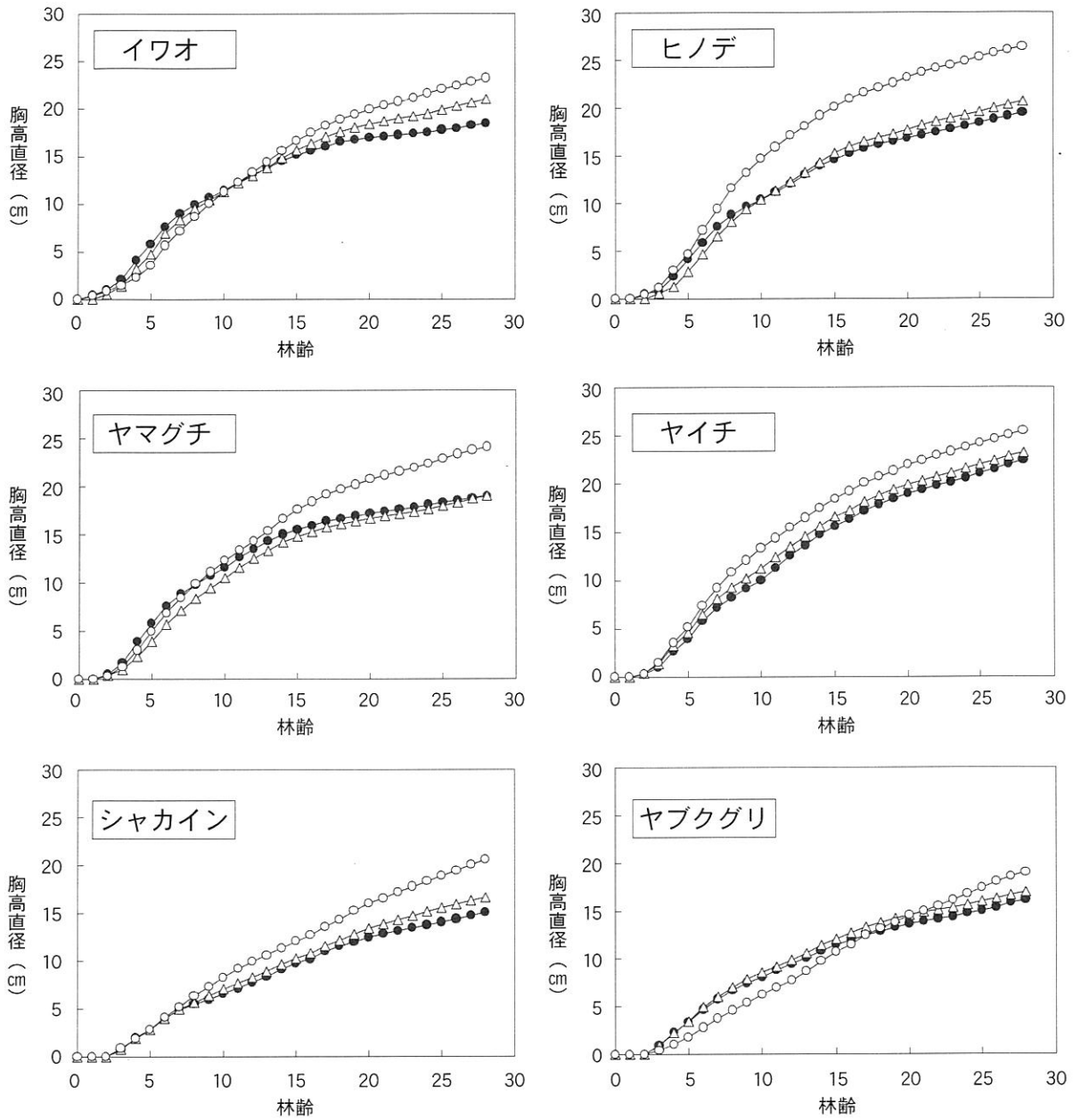


図-20 3段階の密度で植栽されたスギ6品種の胸高直径総成長量

注：●；5000本/ha，△；3000本/ha，○；1500本/haを表し，各試験区の標準木3個体の平均値である。

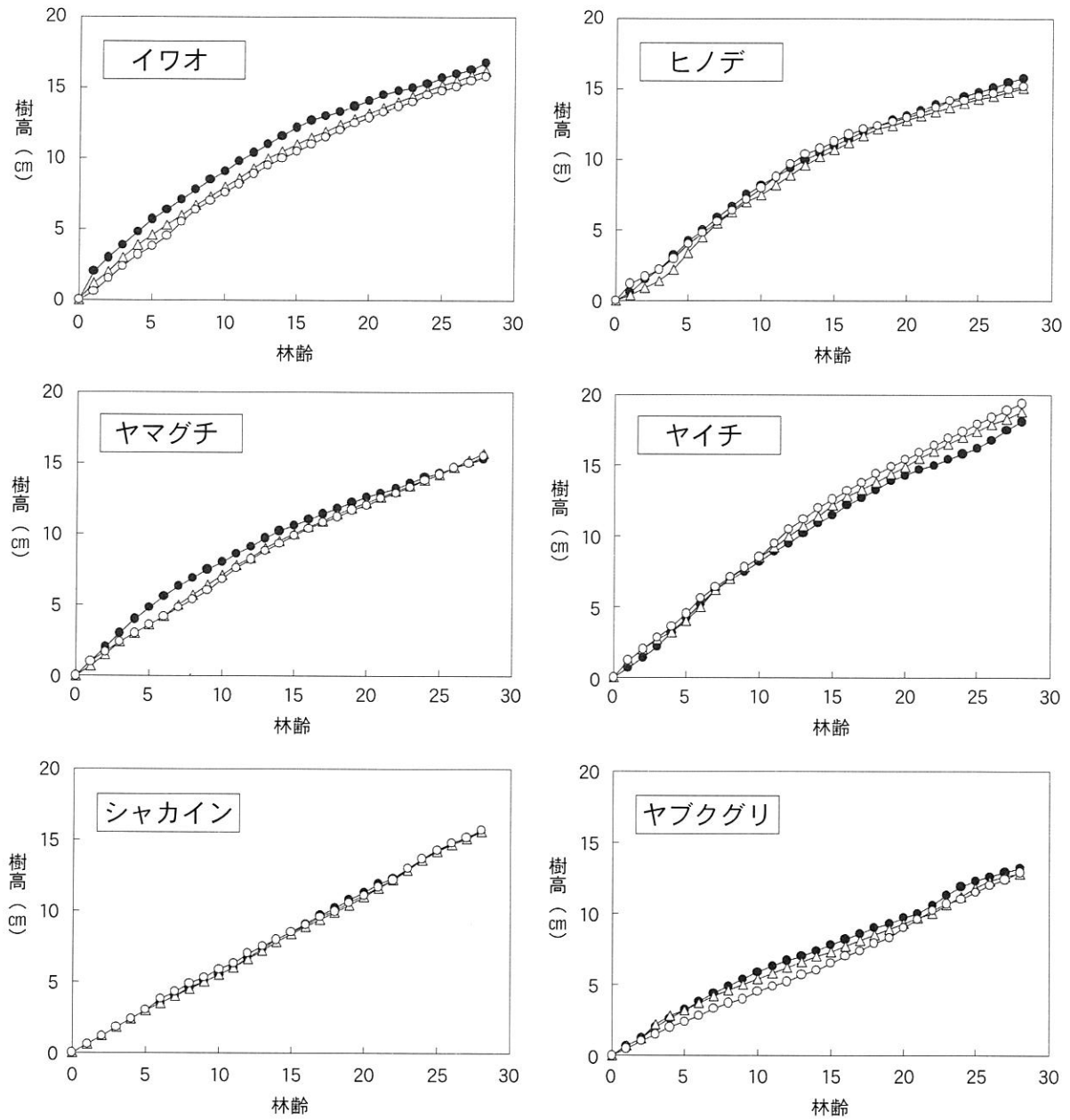


図-21 3段階の密度で植栽されたスギ6品種の樹高総成長量

注：●；5000本/ha, △；3000本/ha, ○；1500本/haを表し、各試験区の標準木3個体の平均値である。

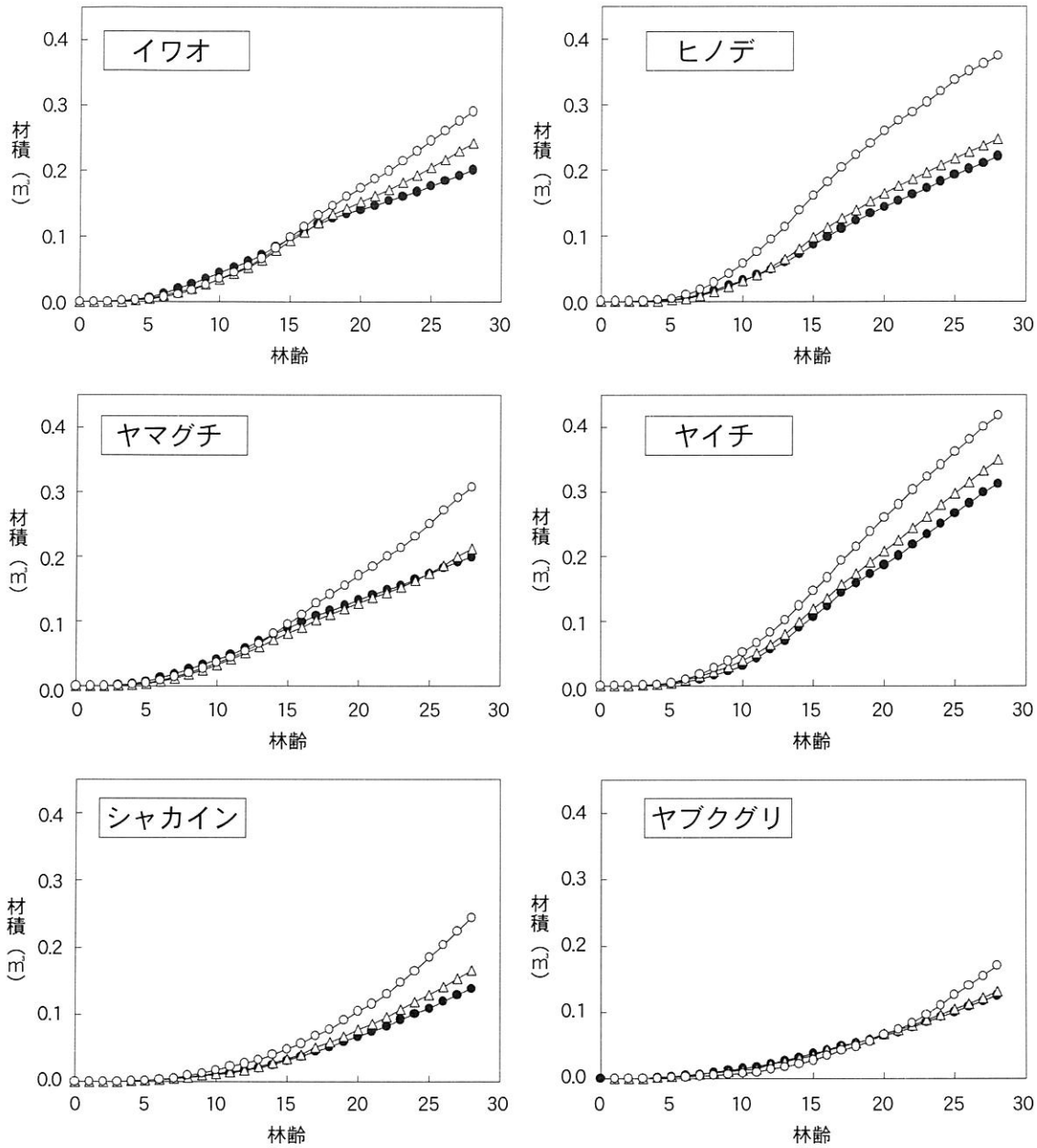


図-22 3段階の密度で植栽されたスギ6品種の単木材積総成長量

注：●；5000本/ha，△；3000本/ha，○；1500本/haを表し，各試験区の標準木3個体の平均値である。

表-27 胸高直径, 樹高および単木材積の分散分析結果

要因	df	胸高直径				樹高				単木材積			
		MS	Fv	VC	D	MS	Fv	VC	D	MS	Fv	VC	D
植栽密度 (A)	2	57.0	76.8	23	**	0.0	0.2	0	ns	0.0125	57.7	12	**
品 種 (B)	5	63.3	85.4	64	**	31.4	255.0	94	**	0.0314	145.0	77	**
A × B	10	3.7	5.0	7	**	0.5	4.2	3	**	0.0014	6.3	7	**
誤 差	36	0.7		5		0.1		3		0.0002		4	
全 体	53			100				100				100	

注: df; 自由度, MS; 平均平方, Fv; F値, VC; 分散寄与率, D; 判定, **: 1%水準で有意差あり, *: 5%水準で有意差あり, ns; 有意差なしを表す。

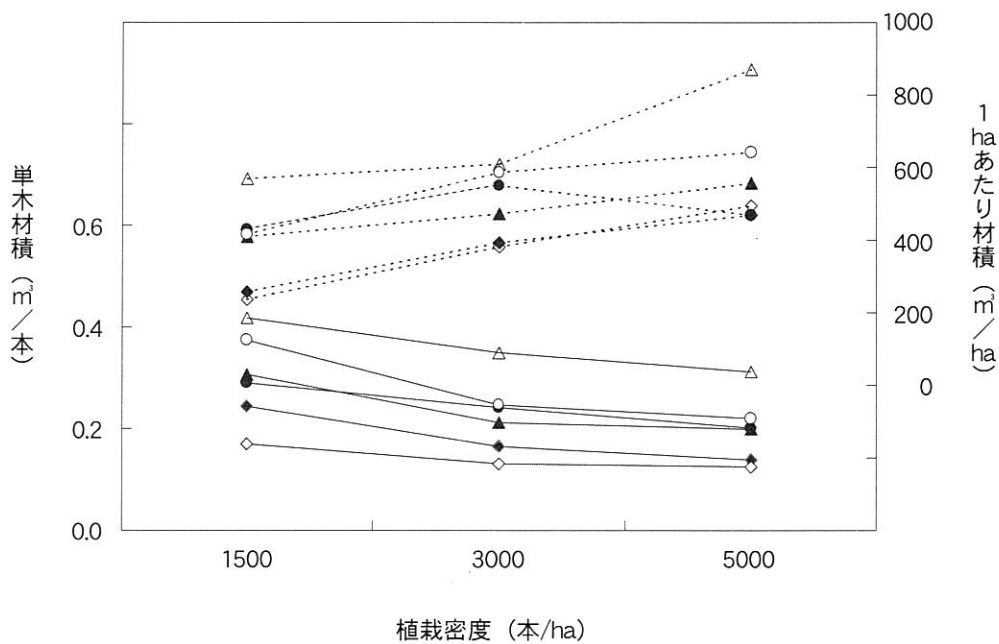


図-23 3段階の密度で植栽されたスギ6品種の単木材積と1ヘクタールあたり材積

注: ●;イワオ, ○;ヒノデ, ▲;ヤマグチ, △;ヤイチ, ◆;シャカイン, ◇;ヤブクグリを表す。単木材積を実線で, 1ヘクタールあたり材積を点線で示す。

次に, 胸高直径, 樹高および単木材積の総成長量をそれぞれ図-20, 図-21および図-22に示す。胸高直径および単木材積は全品種において植栽密度の高い試験区ほど小さく, 品種間では早生品種が大きく, 中生品種が小さいという品種の成長型に一致する品種特性を示した。しかし, 樹高は品種間に差が認められたものの, 植栽密度区間には認められなかった。

そこで, 胸高直径, 樹高および単木材積について, 植栽密度と品種を要因とする分散分析を行った。表-27に示すとおり, 胸高直径, 樹高および単木材積は, 樹高への植栽密度の差を除けば, それぞれに品種, 植栽密度およびその交互作用に1%水準で有意な差が認められた。また, 3つの成長指標の分散寄与率は, 品種が植栽密度より顕著に大きかった。したがって, 肥大成長, 材積成長および伸長成長へ及ぼす植栽密度の影響は, 肥大成長と材積成長で認められたものの, 品種の影響に比べて小さいと考えられた。

表-28 スギ6品種の各植栽密度における心材含水率と辺材含水率

品種名	植栽密度 (本/ha)	心材			辺材		
		0.2m	1.2m	4.2m	0.2m	1.2m	4.2m
イワオ	5000	145 (24)	83 (9)	55 (2)	217 (30)	234 (24)	250 (12)
	3000	163 (15)	106 (3)	64 (5)	255 (7)	243 (18)	249 (12)
	1500	168 (12)	106 (15)	70 (7)	251 (22)	244 (29)	230 (5)
ヒノデ	5000	154 (27)	89 (7)	74 (1)	196 (12)	203 (20)	203 (40)
	3000	171 (30)	100 (8)	78 (8)	249 (45)	207 (1)	219 (15)
	1500	199 (37)	140 (19)	86 (16)	273 (46)	231 (34)	267 (5)
ヤマグチ	5000	99 (17)	80 (4)	62 (8)	218 (16)	208 (7)	207 (18)
	3000	119 (2)	70 (14)	56 (2)	187 (14)	184 (16)	197 (18)
	1500	172 (26)	102 (5)	65 (2)	219 (24)	201 (23)	201 (10)
ヤイチ	5000	69 (2)	54 (9)	53 (6)	278 (27)	237 (8)	234 (9)
	3000	71 (16)	59 (2)	50 (2)	250 (30)	269 (19)	234 (12)
	1500	110 (50)	65 (12)	56 (8)	282 (13)	256 (39)	265 (10)
シャカイン	5000	72 (13)	52 (5)	47 (3)	187 (13)	216 (14)	217 (11)
	3000	77 (4)	88 (9)	58 (6)	197 (7)	219 (20)	216 (11)
	1500	93 (6)	88 (13)	82 (10)	210 (16)	235 (7)	217 (6)
ヤブクグリ	5000	92 (19)	69 (8)	56 (3)	218 (24)	206 (11)	211 (20)
	3000	110 (25)	82 (13)	60 (7)	221 (18)	211 (12)	207 (14)
平均値	1500	164 (17)	93 (13)	72 (11)	217 (26)	210 (13)	216 (18)
標準偏差		125	85	64	229	223	224
変動係数 (%)		45.3	23.1	12.5	36.0	27.0	24.6
		36.2	27.3	19.7	15.7	12.1	11.0

注：() は標準偏差を表す。

ここで、各品種の植栽密度区ごとの標準木材積およびそれと残存率から算出した1ヘクタール当たりの材積を図-23に示す。単木材積は、1500本区が 0.301m^3 、3000本区が 0.225m^3 、5000本区が 0.200m^3 であり、全ての品種において植栽密度と負の関係が認められた。一方、1ヘクタール当たりの推定材積は、1500本区が 386m^3 、3000本区が 499m^3 、5000本区が 584m^3 であり、全品種とも植栽密度と正の関係にあった。このことから、品種と植栽密度によって材積成長量をコントロールできることが示唆された。

なお、残存率と成長に及ぼす植栽密度の影響は、植栽後に行われた間伐等の保育方法や林分の閉鎖状態によって異なると推測されるが、本研究対象林分がこれまで一度も間伐されていないことから、明らかに品種および植栽密度が影響していると判断された。

5.2.2 心材と辺材の生材含水率

心材の生材含水率（以後、心材含水率という。）と辺材の生材含水率（以後、辺材含水率という。）を品種、地上高および植栽密度区ごとに表-28に示す。心材含水率が品種やクローンによって異なることは既に報告（河澄ら；1991a, 同左；1991b, 藤澤ら；1995a）^{39,40,54} されており、本研究においても同様の結果が得られた。たとえば、ヒノデの心材含水率はいずれの地上高および植栽密度区でも高い値を示し、逆に、ヤイチのそれは低い値を示した。

次に、植栽密度、地上高および品種を要因とする分散分析結果を表-29に示す。心材含水率は、3つの各要因と、品種と植栽密度の交互作用、地上高と植栽密度の交互作用にそれぞれ1%水準で有意な差が認められ、地上高の分散寄与率が品種のその2倍で最も高かった。そこで、各品種の地上高別の心材含水率をみると、地上高の高い部位ほど心材含水率が低い傾向にあった。心材含水率の樹幹高さ方向の変動に

表-29 心材含水率と辺材含水率の分散分析結果

要因	df	心 材				辺 材			
		MS	Fv	VC	D	MS	Fv	VC	D
植栽密度 (A)	2	11976	54.3	10	**	3662	8.9	5	**
地上高 (B)	2	52287	237.1	42	**	565	1.4	1	ns
品 種 (C)	5	11620	52.7	23	**	11012	26.7	39	**
A × B	4	1240	5.6	2	**	200	0.5	1	ns
B × C	10	334	1.5	1	ns	1327	3.2	9	**
A × C	10	2477	11.2	10	**	903	2.2	6	*
A × B × C	20	316	1.4	3	ns	472	1.1	7	ns
誤 差	108	221		10		412		32	
全 体	161			100				100	

注：df；自由度，MS；平均平方，Fv；F値，VC；分散寄与率，D；判定，**；1%水準で有意差あり，*；5%水準で有意差あり，ns；有意差なしを表す。

関して、中田ら（1998）⁴⁹⁾は同一品種内ではほぼ同じ傾向を示し、7つのパターンに分けられると報告している。本研究でも各品種内の個体間差は小さく、樹幹下部で高く上部で低くなるタイプ、樹幹下部で高く上部で低下するが再び上昇するタイプ、前者のタイプの上部で再び低下するタイプが存在した。このように、心材含水率の樹幹高さ方向の変動パターンには品種特性が認められ、植栽密度の影響は小さいことが示唆された。

ここで、胸高部位における心材含水率と胸高直径の関係について検討した。全ての品種で有意な正の相関関係（ $r=0.223-0.902$ ）が認められ、肥大成長が速い個体ほど高い心材含水率をもつとする河澄ら（1991a）³⁹⁾の報告と同様の結果が得られた。したがって、植栽密度が心材含水率へ影響した理由は、植栽密度の違いに起因する肥大成長の良否と関係していることが示唆された。なお、現段階において、心材含水率と肥大成長との生物学的な因果関係は不明である。

一方、辺材含水率は、品種、植栽密度、品種と地上高の交互作用、品種と植栽密度の交互作用にいずれも5%水準以下で有意な差が認められたが、品種の影響が極めて大きいと考えられた。また、胸高部位の辺材含水率と胸高直径との間に1%水準で有意な正の相関関係（ $r=0.33$ ）が認められた。最大含水率と密度との間には反比例の相関関係があり（伏谷ら；1985）⁸⁰⁾、ほぼ飽水状態にあるスギ辺材でも含水率は密度と反比例するとされている（中田ら；1998）⁴⁹⁾。本研究においても、辺材の最大含水率に対する生材含水率比の全個体平均値は0.89でほぼ飽水状態であると思われ、辺材含水率と容積密度との間に1%水準で有意な負の相関関係（ $r=-0.72$ ）が得られた。このことから、辺材含水率は、成長の良否よりもむしろ品種および後述する植栽密度による容積密度の違いを反映していると推察された。

5.2.3 丸太の生材密度

植栽密度および丸太番号、品種を要因とする丸太の生材密度の分散分析結果を表-30に示す。植栽密度が5%水準で、丸太番号および品種がそれぞれ1%水準で、また植栽密度と丸太番号、丸太番号と品種の交互作用にそれぞれ1%水準で有意な差が認められた。

それぞれの要因の各水準の平均値については、図-24に示すとおり、5000本区の密度が807kg/m³で1500本区の1.01倍であり、植栽密度区の違いは顕著でなかった。また、6番丸太が906kg/m³で1番丸太の

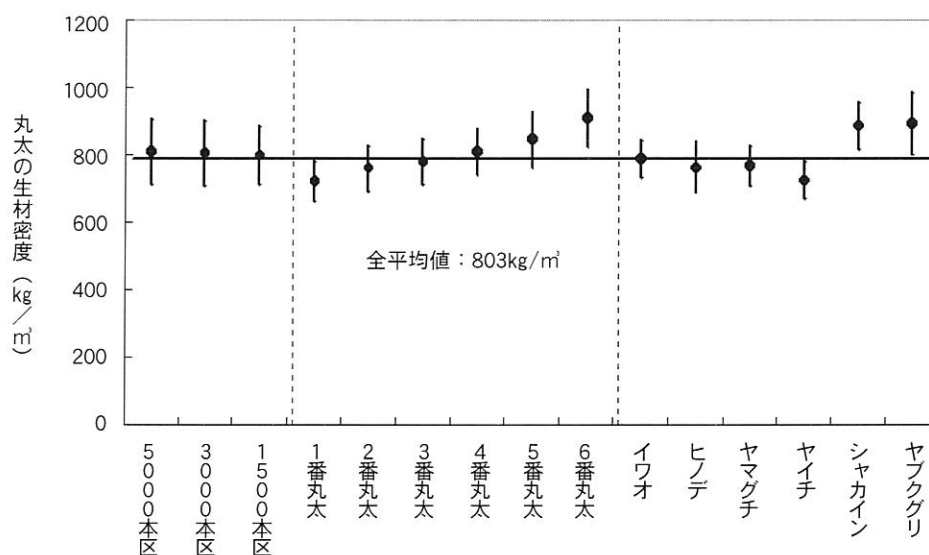


図-24 丸太生材密度の各要因平均値と標準偏差

表-30 丸太生材密度の分散分析結果

要因	DSS	df	MS	Fv	Pv	D
植栽密度 (A)	5969	2	2984.5	3.76	0.02	*
丸太番号 (B)	1174591	5	234918.1	295.99	0.00	**
品 種 (C)	1287724	5	257544.8	324.50	0.00	**
A × B	28050	10	2805.0	3.53	0.00	**
A × C	13864	10	1386.4	1.75	0.07	ns
B × C	92882	25	3715.3	4.68	0.00	**
A × B × C	37023	50	740.5	0.93	0.60	ns
誤 差	171434	216	793.7			
全 体	2811536	323				

注：DSS；偏差平方和，df；自由度，MS；平均平方，Fv；F値，Pv；P値，D；判定，**；1%水準で有意差あり，*；5%水準で有意差あり，ns；有意差なしを表す。

1.26倍であり，地上高の高い部位にある丸太ほど直線的に増大する傾向にあった。さらに，シャカインおよびヤブクグリの密度が890kg/m³前後と大きく，ヤイチのその1.23倍であった。以上のことと表-30に示すF値の大きさから考えたとき，丸太密度に及ぼす植栽密度の影響は，品種および地上高の影響に比較すると，極めて小さいと考えられた。なお，丸太の生材密度の全平均値は803kg/m³であった。

5.2.4 成熟材と未成熟材の容積密度

品種，地上高，植栽密度区ごとの容積密度 (kg/m³) を未成熟材と成熟材に分けて表-31に示す。なお，ここでは未成熟材の範囲を髓から15年輪目までとした。材の密度が品種あるいはクローンによって異なることは既に小田らをはじめ数多く報告 (小田ら；1988，同左；1989，同左；1990，古賀ら；1990，津島；1988，津島ら；1989a，藤崎ら；1986，藤澤ら；1992，同左；1993，同左；1995a，見尾ら；

1985)^{34-36,42,45,46,51-54,56} されているが、本研究においても同様の結果が得られた。すなわち、中生品種であるシャカイン、ヤブクグリの容積密度は大きく、早生品種であるイワオ、ヒノデ、ヤマグチ、ヤイチは小さな値を示した。また、未成熟材の容積密度はいずれの地上高においても成熟材に比べて大きく、地上高の高い部位ほど小さい傾向にあった。一方、成熟材のそれは地上高1.2mでやや小さな値を示し、品種内では植栽密度区間に差がないか高い植栽密度区がわずかに大きい傾向にあった。

そこで、植栽密度、地上高および品種が容積密度へ及ぼす影響を検討するため、各個体の未成熟材と成熟材について分散分析を行った。表-32に示すように、未成熟材の容積密度では、品種および地上高、植栽密度と品種の交互作用、地上高と品種の交互作用にそれぞれ1%水準で有意な差が認められた。一方、成熟材では品種および植栽密度、品種と地上高の交互作用にそれぞれ1%水準、地上高および3つの要因の交互作用にそれぞれ5%水準で有意な差が認められた。未成熟材および成熟材の両者とも品種の分散寄与率が最も高かった。

なお、各品種の成熟材の容積密度と平均年輪幅との間に、ヤマグチとヤイチでは5%水準で有意な負の相関関係 ($r=-0.395, -0.464$) が認められ、イワオ、ヒノデおよびヤブクグリでは統計的に有意な関係は認められなかったものの、弱い負の傾向が存在した。前述したように低い植栽密度区ほど肥大成長が良いことを考えれば、成熟材の容積密度にだけ植栽密度がわずかに影響した理由は、肥大成長速度に起因していると考えられた。

以上のように、容積密度に及ぼす植栽密度の影響が成熟材でわずかに認められ、それは品種に比べると明らかに小さかった。

表-31 スギ6品種の各植栽密度における成熟材と未成熟材の容積密度

品種名	植栽密度 (本/ha)	未成熟材 (kg/m ³)			成熟材 (kg/m ³)		
		0.2m	1.2m	4.2m	0.2m	1.2m	4.2m
イワオ	5000	305 (9)	310 (4)	306 (16)	333 (21)	307 (27)	301 (7)
	3000	312 (11)	314 (19)	304 (8)	297 (17)	306 (14)	306 (21)
	1500	328 (13)	334 (3)	316 (13)	296 (21)	295 (18)	323 (5)
ヒノデ	5000	308 (16)	305 (15)	303 (4)	329 (16)	306 (6)	312 (15)
	3000	293 (6)	303 (23)	295 (7)	286 (25)	302 (17)	315 (7)
	1500	279 (3)	289 (5)	280 (2)	279 (13)	287 (8)	295 (10)
ヤマグチ	5000	321 (22)	321 (5)	317 (12)	335 (17)	326 (4)	316 (13)
	3000	326 (11)	318 (8)	312 (2)	351 (16)	326 (15)	317 (3)
	1500	359 (61)	342 (14)	312 (6)	313 (16)	324 (5)	306 (18)
ヤイチ	5000	325 (13)	321 (7)	315 (4)	271 (9)	297 (13)	312 (13)
	3000	348 (28)	325 (38)	334 (4)	302 (17)	280 (14)	310 (11)
	1500	316 (14)	317 (8)	305 (5)	276 (7)	269 (12)	281 (8)
シャカイン	5000	450 (23)	402 (7)	378 (3)	371 (10)	322 (7)	329 (11)
	3000	463 (18)	399 (14)	387 (6)	356 (14)	324 (7)	318 (8)
	1500	459 (25)	415 (79)	383 (4)	353 (19)	324 (17)	328 (12)
ヤブクグリ	5000	374 (22)	369 (14)	350 (16)	314 (26)	330 (12)	340 (35)
	3000	374 (12)	380 (18)	367 (9)	318 (7)	317 (17)	345 (9)
	1500	380 (7)	394 (17)	362 (12)	328 (44)	315 (26)	340 (15)
平均値		351	342	329	317	309	316
標準偏差		58.0	43.7	33.4	33.2	21.2	19.9
変動係数 (%)		16.5	12.8	10.2	10.5	6.9	6.3

注：髓から15年輪までを未成熟材、16年輪から最外年輪までを成熟材とした。()は標準偏差を表す。

表-32 容積密度の分散分析結果

要因	df	未成熟材				成熟材			
		MS	Fv	VC	D	MS	Fv	VC	D
植栽密度 (A)	2	401	1.1	0	ns	2031	7.7	4	**
地上高 (B)	2	6610	17.9	4	**	1147	4.4	2	*
品種 (C)	5	53368	144.9	76	**	8773	33.4	42	**
A × B	4	323	0.9	0	ns	162	0.6	1	ns
A × C	10	922	2.5	3	**	436	1.7	4	ns
B × C	10	1890	5.1	5	**	1277	4.9	12	**
A × B × C	20	113	0.3	1	ns	453	1.7	9	*
誤差	108	368		11		263		27	
全体	161			100				100	

注：髓から15年輪までを未成熟材，16年輪から最外年輪までを成熟材とした。df；自由度，MS；平均平方，Fv；F値，VC；分散寄与率，D；判定，**；1%水準で有意差あり，*；5%水準で有意差あり，ns；有意差なしを表す。

5.2.5 心材色の品種間差と植栽密度間差

品種，植栽密度区ごとの L^* 値， a^* 値， b^* 値の測定結果を表-33に示す。スギの心材色は品種やクローンによって異なり，とくに明度の変動が大きいことが知られている（河澄ら；1991a，同左；1991b，平川ら；2003）^{39,40,50}。本研究でも， L^* 値， a^* 値， b^* 値の全てに品種の違いによる影響が顕著であった。また， L^* 値は植栽密度の高い試験区ほど大きく，逆に， a^* 値は小さい傾向が認められたが， b^* 値には一定の傾向は認められなかった。そこで，植栽密度と品種が心材色へ及ぼす影響を検討するため，分散分析を行った。表-34に示すとおり，品種には3つの色指数において，植栽密度には L^* 値と a^* 値に1%水準で有意な差が認められたが， b^* 値には統計的な有意差が認められなかった。分散寄与率は，3つの色指数とも品種が植栽密度に比べ高く，とくに L^* 値と b^* 値で顕著であった。

ところで，品種間，品種内および個体内における心材明度と心材含水率との間には負の相関関係が存在するとされている（河澄ら；1991a）³⁹。本研究においても，胸高部位の心材 L^* 値と心材含水率との間に有意な負の相関関係（ $r=-0.687$ ）が認められた。前述したように，品種および植栽密度が心材含水率へ影響することから考えて，心材 L^* 値は品種および植栽密度の違いによる心材含水率の影響を受けていると推察された。

5.2.6 丸太動的ヤング率の品種間差と植栽密度間差

各品種の植栽密度区ごとの丸太の平均動的ヤング率を図-25に示す。丸太の動的ヤング率は，品種やクローンによって異なり，そのバラツキが大きいこと（平川ら；2003，藤澤ら；1992，山下ら；2000，津島ら；2005a）^{50,52,60,62}が知られており，本研究でも同様の結果が得られた。すなわち，全植栽密度の品種平均値は，1番丸太ではヤブクグリ，ヒノデ，ヤマグチ，ヤイチ，イワオ，シャカインの順に高くなり，その範囲は2.57-5.79GPaと大きなバラツキを示した。2番丸太より上部の丸太においても，各品種の順位はおおむね変わらず，バラツキも1番丸太に比べやや小さい程度であった。また，図-26に示すように，ヤブクグリを除く5品種の動的ヤング率は植栽密度の高い試験区ほど高い値を示したが，ヤブクグリのそれは植栽密度の高い試験区ほど3番丸太以下で低い値を示し，逆に4番丸太以上では高い値を示した。

表-33 スギ6品種の各植栽密度における心材色

品種名	植栽密度 (本/ha)	心材色		
		L^*	a^*	b^*
イワオ	5000	69.4 (1.65)	5.3 (0.16)	19.8 (0.30)
	3000	66.7 (0.40)	6.5 (0.43)	19.8 (0.46)
	1500	65.2 (0.27)	8.0 (1.57)	19.8 (0.89)
ヒノデ	5000	72.9 (0.45)	6.6 (0.46)	21.8 (0.74)
	3000	70.0 (0.71)	7.4 (1.93)	21.7 (0.60)
	1500	66.7 (1.13)	11.6 (1.67)	21.7 (0.57)
ヤマグチ	5000	72.7 (4.00)	5.7 (1.15)	22.2 (2.83)
	3000	71.6 (3.32)	6.9 (0.11)	21.9 (2.68)
	1500	73.4 (1.15)	5.6 (1.17)	22.9 (0.88)
ヤイチ	5000	77.9 (0.95)	6.9 (0.68)	22.8 (0.43)
	3000	77.6 (1.64)	7.5 (1.44)	22.3 (1.33)
	1500	75.3 (1.12)	7.2 (0.41)	24.3 (0.62)
シャカイン	5000	74.1 (0.48)	8.3 (1.50)	23.6 (0.19)
	3000	73.2 (0.40)	8.3 (0.28)	23.3 (0.74)
	1500	71.3 (1.29)	7.7 (1.17)	24.0 (0.36)
ヤブクグリ	5000	73.7 (2.31)	8.6 (1.23)	23.8 (0.28)
	3000	72.6 (1.27)	9.4 (1.25)	23.0 (0.40)
	1500	72.2 (3.25)	9.3 (2.25)	22.6 (0.41)
平均値		71.8	7.8	22.0
標準偏差		3.59	1.92	1.76
変動係数 (%)		4.5	14.6	7.1

注：() は標準偏差を表す。

表-34 心材色の分散分析結果

要因	df	L^*				a^*				b^*			
		MS	Fv	VC	D	MS	Fv	VC	D	MS	Fv	VC	D
植栽密度 (A)	2	34.7	10.8	10	**	7.9	5.3	9	**	1.3	1.1	2	ns
品種 (B)	5	98.5	30.7	68	**	12.4	8.4	35	**	17.6	14.5	62	**
A × B	10	4.8	1.5	7	ns	4.4	2.9	25	**	0.8	0.7	6	ns
誤差	36	3.2		16		1.5		31		1.2		31	
全体	53			100				100				100	

注：df；自由度，MS；平均平方，Fv；F値，VC；分散寄与率，D；判定，**；1%水準で有意差あり，ns；有意差なしを表す。

次に、各品種の1番丸太から6番丸太までのデータを用い、植栽密度、丸太番号および品種を要因とする分散分析を行った。表-35に示すとおり、3つの要因のほか、植栽密度と品種の交互作用、丸太番号と品種の交互作用にそれぞれ1%水準で有意な差が認められた。品種の分散寄与率が56%で最も高く、植栽密度のそれは6%と低かった。このことから、丸太の動的ヤング率へ及ぼす植栽密度の影響は、わずかに認められたものの、品種の影響に比べると小さいことが示唆された。

スギ丸太の動的ヤング率に関して、1番丸太がその上部丸太に比べ低いこと（小泉ら；1997，朱ら；2003，山下ら；2000，津島ら；2005a）^{41,44,60,62} や樹幹高さ方向の変動パターンに品種特性があること（朱ら；2003，山下ら；2000，津島ら；2005a）^{44,60,62} が報告されている。本研究では、全ての品種および植栽密度において、1番丸太の動的ヤング率が2番丸太より上部のそれに比べ低い値を示し、ヤブクグリでは地上高が増すほど著しく高い傾向、その他の品種では1番丸太が最も低く、2番丸太以上では1

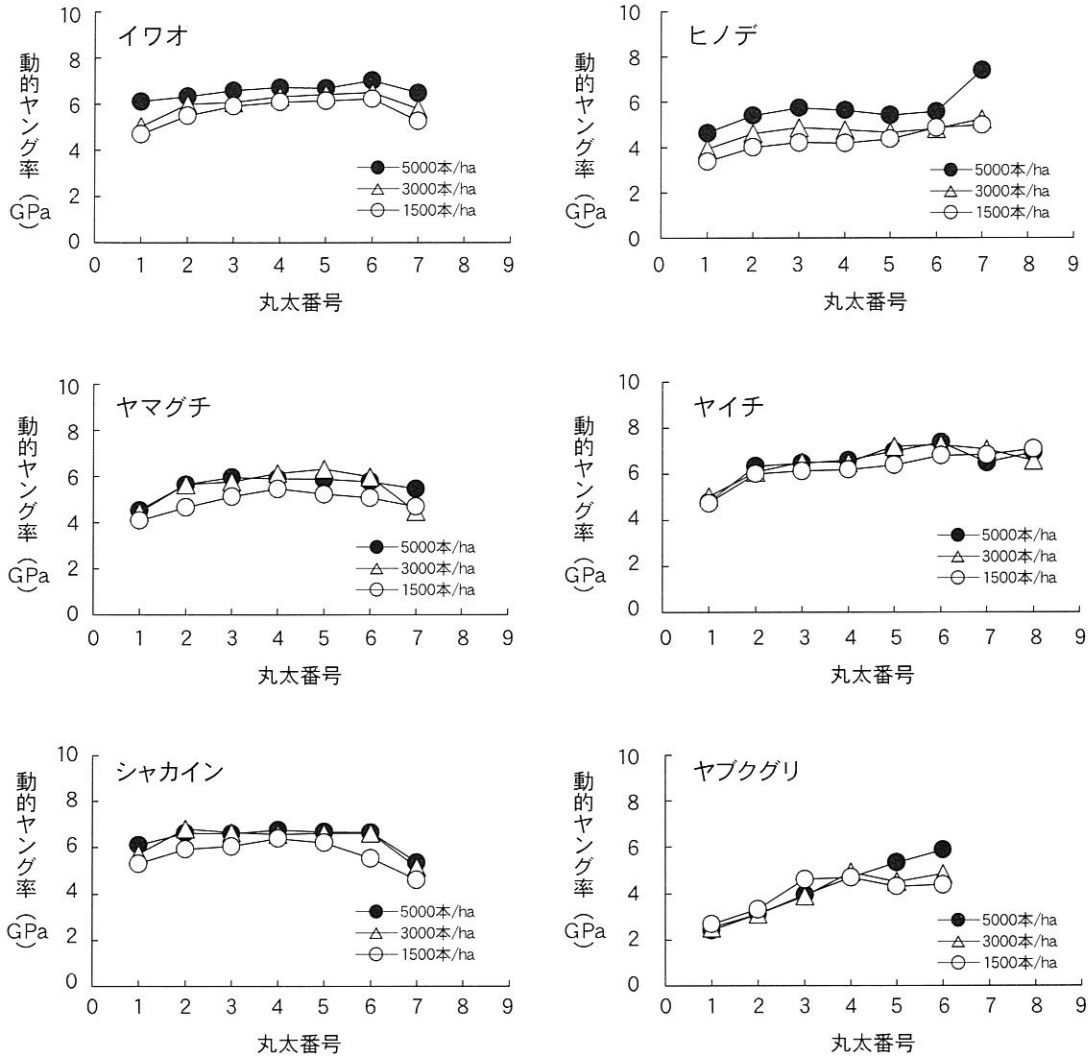


図-25 スギ6品種の各植栽密度における動的ヤング率の樹高方向変動

番丸太よりもやや高い値で比較的安定する傾向を示した。表-35に示す植栽密度と丸太番号の交互作用に有意差が認められなかったことから、植栽密度はスギ品種の動的ヤング率の樹幹高さ方向の変動パターンにはほとんど影響しないと考えられた。

このように、丸太の動的ヤング率への植栽密度の影響は、品種の影響に比べると小さいがわずかに存在し、その影響が品種によって異なることが示唆された。

5.2.7 縦圧縮試験と曲げ試験で得られた力学的性質

髓から15年輪目付近の無欠点試験体から得られ力学的性質を品種および植栽密度ごとに表-36に示す。これらの力学的性質は、これまで検討してきた各種の木材性質と同じように品種ごとに異なる値を示した。そこで、各力学的性質への植栽密度と品種の影響を分散分析により検討した。表-37に示すとおり、品種は全ての力学的性質に1%水準で有意な差が認められ、植栽密度は縦圧縮強さと曲げヤング率には1%水準の有意差が認められたものの、曲げ強さと曲げ仕事量には統計的な差が認められなかった。いずれの力学的性質においても品種の分散寄与率が著しく高いことから、植栽密度よりも品種の影響が大きいことが示唆された。

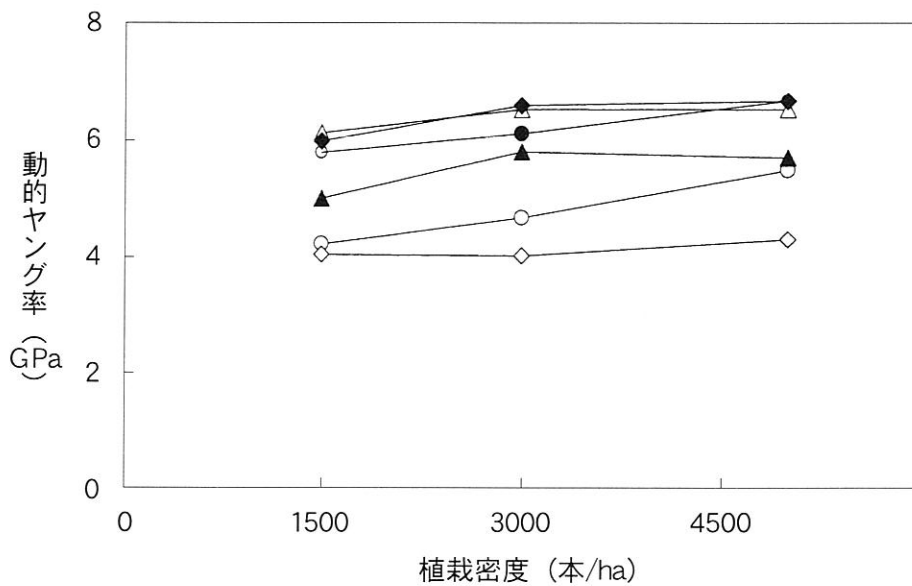


図-26 スギ6品種の各植栽密度における平均動的ヤング率

注：●；イワオ，○；ヒノデ，▲；ヤマグチ，△；ヤイチ，◆；シャカイン，◇；ヤブクグリを表す。

表-35 動的ヤング率の分散分析結果

要因	DSS	df	MS	Fv	Pv	VC (%)	D
植栽密度 (A)	25.57	2	12.79	88.4	0.000	6	**
丸太番号 (B)	86.75	5	17.35	120.0	0.000	20	**
品 種 (C)	242.60	5	48.52	335.5	0.000	56	**
A × B	1.20	10	0.12	0.8	0.602	0	ns
A × C	9.93	10	0.99	6.9	0.000	2	**
B × C	23.92	25	0.96	6.6	0.000	6	**
A × B × C	9.30	50	0.19	1.3	0.114	2	ns
誤 差	31.24	216	0.14			7	
全 体	430.49	323				100	

注：DSS；偏差平方和，df；自由度，MS；平均平方，Fv；F値，Pv；P値，VC；分散寄与率，D；判定，**；1%水準で有意差あり，ns；有意差なしを表す。

次に、各力学的性質ごとに品種の影響をみると、品種によって異なる傾向を示した。すなわち、図-27に示すように、ヤブクグリを除く5品種の縦圧縮強さの平均値は、5000本区（25.7MPa）が1500本区（23.6MPa）より大きな値を示したが、ヤブクグリでは5000本区が逆に10%近く小さな値を示した。また、図-28に示すように、ヤブクグリを除く5品種の曲げヤング率の平均値は、5000本区（8.82GPa）が1500本区（7.37GPa）より大きかったが、ヤブクグリでは5000本区が逆に19%近く小さかった。さらに、ヤブクグリを除く5品種の曲げ強さは、植栽密度区間に統計的な有意差は認められなかったが、5000本区（52.9MPa）が1500本区（49.7MPa）よりやや大きく、逆に、ヤブクグリでは5000本区が8%ほど

表-36 スギ6品種の各植栽密度における力学的性質

品種名	植栽密度 (本/ha)	縦圧縮強さ (Mpa)	曲げヤング率 (Gpa)	曲げ強さ (Mpa)	曲げ仕事量 (J)
イワオ	5000	29.4 (3.0)	6.8 (0.4)	54.5 (3.2)	1.65 (0.37)
	3000	24.6 (2.6)	6.1 (0.7)	50.9 (4.1)	1.62 (0.39)
	1500	24.5 (1.5)	5.5 (0.2)	49.0 (3.4)	1.90 (0.64)
ヒノデ	5000	24.4 (1.4)	6.4 (0.3)	51.4 (2.2)	1.47 (0.34)
	3000	22.0 (1.0)	5.0 (0.6)	43.9 (5.5)	1.42 (0.14)
	1500	20.0 (2.4)	4.5 (0.2)	48.9 (5.0)	2.09 (0.35)
ヤマグチ	5000	26.3 (0.4)	6.3 (0.2)	54.7 (1.9)	3.29 (0.47)
	3000	26.5 (0.8)	5.8 (0.6)	55.3 (4.2)	3.32 (1.20)
	1500	22.5 (0.7)	3.9 (1.3)	41.7 (11.3)	2.62 (0.21)
ヤイチ	5000	24.8 (1.2)	5.9 (0.6)	50.0 (1.5)	1.46 (0.15)
	3000	24.1 (1.4)	6.1 (0.4)	51.4 (2.7)	1.44 (0.13)
	1500	23.6 (2.0)	6.1 (0.5)	49.9 (1.4)	1.21 (0.14)
シャカイン	5000	28.6 (0.6)	7.0 (0.5)	61.8 (2.8)	2.35 (0.45)
	3000	27.5 (1.4)	6.6 (0.4)	60.1 (3.0)	2.45 (0.46)
	1500	28.2 (3.5)	6.5 (0.3)	59.2 (5.7)	2.31 (0.50)
ヤブクグリ	5000	20.7 (1.1)	2.7 (0.1)	45.4 (0.7)	5.21 (1.43)
	3000	22.6 (0.7)	3.0 (0.2)	49.3 (0.6)	5.30 (1.02)
	1500	23.1 (0.4)	3.4 (0.2)	49.6 (2.4)	5.55 (0.66)
平均値		24.6	5.4	51.5	2.59
標準偏差		2.98	1.39	6.30	1.48
変動係数 (%)		12.1	25.7	12.2	56.9

注：() は標準偏差を表す。

表-37 力学的性質の分散分析結果

要因	df	縦圧縮強さ				曲げヤング率				曲げ強さ				曲げ仕事量			
		MS	Fv	VC	D	MS	Fv	VC	D	MS	Fv	VC	D	MS	Fv	VC	D
植栽密度 (A)	2	18.8	6.4	8	**	9.6	13.3	8	**	48.3	2.8	5	ns	0.0	0.0	0	ns
品 種 (B)	5	48.9	16.7	52	**	32.6	45.3	69	**	187.5	10.7	45	**	19.9	51.6	86	**
A × B	10	8.2	2.8	18	*	2.8	3.8	12	**	43.7	2.5	21	*	0.2	0.6	2	ns
誤 差	36	2.9		22		0.7		11		17.5		30		0.4		12	
全 体	53			100				100				100				100	

注：df；自由度，MS；平均平方，Fv；F値，VC；分散寄与率，D；判定，**；1%水準で有意差あり，*；5%水準で有意差あり，ns；有意差なしを表す。

小さかった。スギ材の力学的性質へ及ぼす植栽密度の影響に関して、ヤブクグリが他の5品種と逆の傾向を示した理由は今のところ不明だが、スギ材の力学的性質へ仮道管二次壁中層のマイクロフィブリル傾角が大きく影響すること(山下ら；2000，平川ら；1995，同左；1996，同左；1997)^{60,76-78)}や年輪構造等に関する今後の詳細な検討が必要であろう。

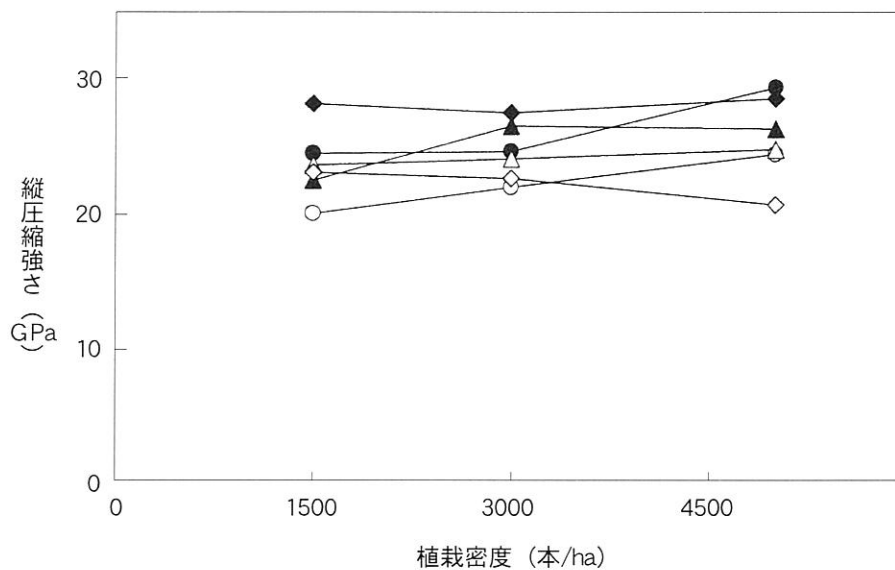


図-27 スギ6品種の各植栽密度における平均縦圧縮強さ

注：●；イワオ，○；ヒノデ，▲；ヤマグチ，△；ヤイチ，◆；シャカイン，◇；ヤブクグリを表す。

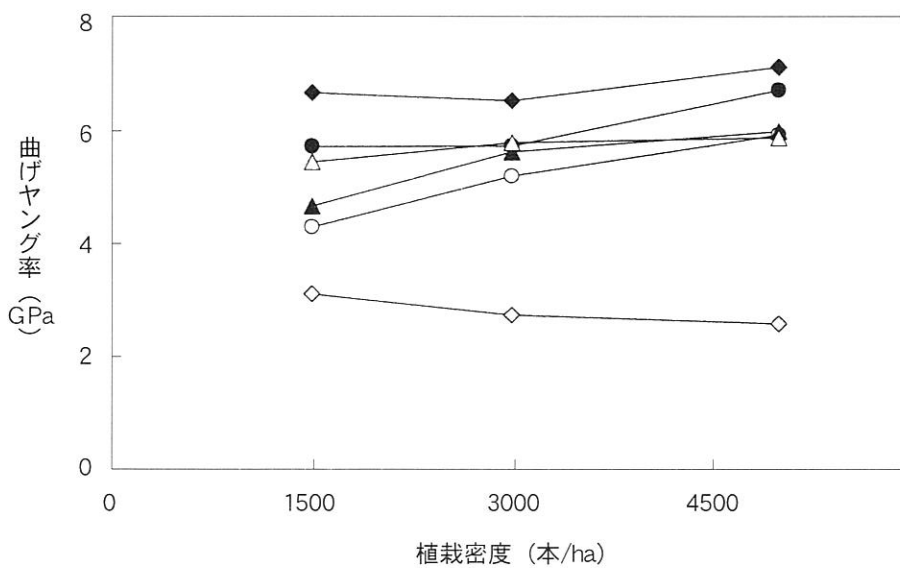


図-28 スギ6品種の各植栽密度における平均曲げヤング率

注：●；イワオ，○；ヒノデ，▲；ヤマグチ，△；ヤイチ，◆；シャカイン，◇；ヤブクグリを表す。

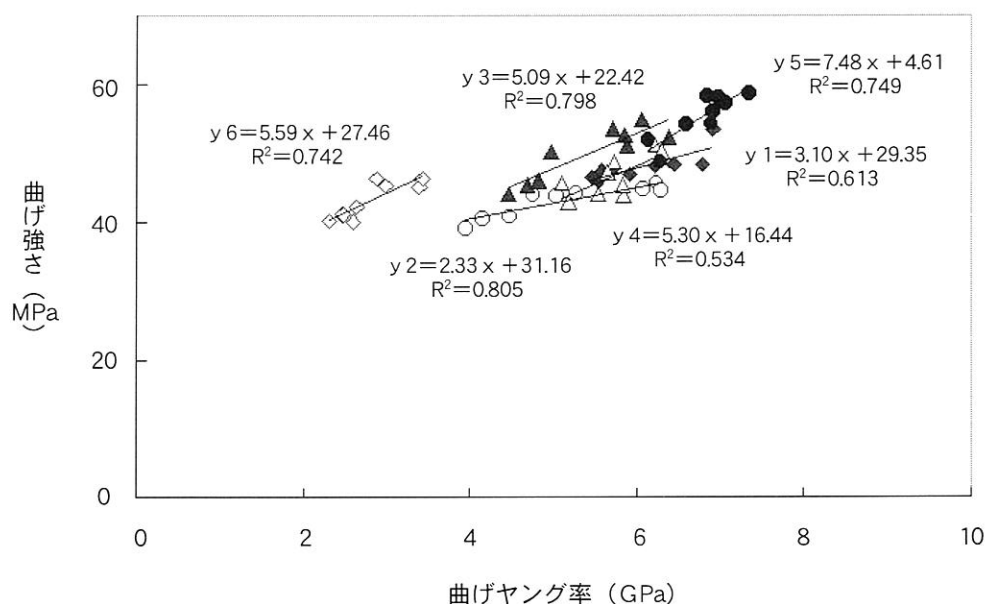


図-29 スギ6品種の曲げヤング率と曲げ強さの関係

注：●y1；イワオ，○y2；ヒノデ，▲y3；ヤマグチ，△y4；ヤイチ，◆y5；シャカイン，◇y6；ヤブクグリを表す。

また、各力学的性質の関係について検討した。気乾密度と曲げ強さおよび曲げ仕事量にそれぞれ1%水準で有意な正の相関関係 ($r=0.38$, $r=0.57$) が認められた。また、縦圧縮強さ、曲げヤング率および曲げ強さの間にはいずれも1%水準で有意な正の相関関係 ($r=0.73$, $r=0.69$, $r=0.70$) が認められ、図-29に示すように、各品種の曲げヤング率と曲げ強さにも高い相関関係が存在した。曲げヤング率と曲げ仕事量の間には1%水準で有意な負の相関関係 ($r=-0.63$) が認められた原因は、曲げヤング率の大きな品種は塑性域に入ると直ちに破壊し、ヤブクグリなどその小さな品種は低い応力状態を維持し大きなたわみの後に破壊する (津島ら；2005a)⁶²⁾ というスギの品種特性と推察された。

5.3 結論

スギさし木品種の成長と木材性質に及ぼす植栽密度の影響を明らかにすることを目的に、1500本/ha、3000本/ha、5000本/haの3段階の異なる密度で植栽された6品種 (イワオ、ヒノデ、ヤマグチ、ヤイチ、シャカイン、ヤブクグリ) を対象に実験し、以下の結果が得られた。

- (1) 植栽密度の高い試験区ほど枯死率が高かった。胸高直径および単木材積は、植栽密度の高い試験区ほど小さく、品種間では品種の成長型に一致した。一方、樹高の植栽密度区間の差は認められなかった。肥大成長および材積成長へ及ぼす植栽密度の影響は品種の影響に比べ小さかった。
- (2) 心材含水率は、品種によって異なり、植栽密度の高い試験区ほど低かった。また、その樹幹高さ方向の変動パターンは、植栽密度に関わらず品種で同じ傾向を示し、地上高の高い部位ほど低かった。胸高直径と心材含水率および辺材含水率の間にそれぞれ正の相関関係が認められた。辺材含水率への品種および植栽密度の影響が認められ、この原因が品種および植栽密度に起因する材の密度の違いと推察された。

(3) 中生品種の容積密度が早生品種のそれに比べて大きかった。容積密度へ及ぼす植栽密度の影響は、植栽密度の高い試験区ほどわずかに高い傾向が成熟材で認められたが、品種の影響に比べると小さかった。

(4) 心材色の L^* 値, a^* 値, b^* 値は、ともに品種の違いによって大きく異なった。植栽密度の影響が L^* 値と a^* 値に認められ、植栽密度の高い試験区ほど L^* 値が高く、 a^* 値が低かった。これは、胸高部位の心材 L^* 値と心材含水率との間に負の相関関係が認められたことから、植栽密度に起因する心材含水率の違いと関連していることが示唆された。

(5) 丸太の動的ヤング率は、品種によって異なり、1番丸太がそれより上部に比べ低く、ヤブクグリを除く5品種では植栽密度の高い試験区ほどわずかに高い傾向が認められた。動的ヤング率の樹幹高さ方向の変動パターンに品種特性が認められたが、植栽密度の影響は認められなかった。

(6) 縦圧縮強さ、曲げヤング率、曲げ強さおよび曲げ仕事量は、品種ごとに異なり、植栽密度の高い試験区ほど縦圧縮強さおよび曲げヤング率がわずかに高かったが、品種の影響に比べると小さかった。ヤブクグリと他の5品種では力学的性質に及ぼす植栽密度の影響が異なる傾向を示した。

以上のことから、スギの重要な材質指標である各種の木材性質へ及ぼす品種すなわち遺伝的要因の影響は大きいですが、植栽密度の影響もわずかながら存在することが明らかとなった。

第6章 スギ品種の木材性質へ及ぼす林齢の影響

本章では、前章につづき森林施業を含む立地・環境要因の影響を明らかにするため、間伐期と主伐期のスギ3品種を対象に木材性質（丸太動的ヤング率）の林齢間変動について検討した。

6.1 材料と方法

6.1.1 材料

試験林は、間伐期と主伐期にあたるヤブクグリ、アヤスギ、オビアカのスギ3品種で、図-30に示すとおり、大分県下の5林分を対象とした。表-38に示すとおり、林分Aは、22年生で西日本主要スギ品種展示林として在来品種27品種が3687本/haの植栽密度で植栽されており、15年生時と20年生時に間伐が行われている。林分Bは、28年生で地蔵原スギ品種・植栽密度試験地として10品種が1500本/ha、3000本/ha、5000本/haの3段階の植栽密度で植栽されており、これまで間伐は実施されておらず、本研究では標準的な植栽密度である3000本/ha区を対象とした。林分C、D、Eはそれぞれ単一品種が植栽され主伐期に達した林分であり、詳細な施業履歴は不明である。なお、これらの林分のうち、林分A、B、CおよびDは、品種を同定するためにMuPS (Multiplex PCR of SCAR markers) によるDNA分析を行い、MuPS型データベース（久枝ら；2003）³²⁾と照合し、品種を同定した。



図-30 試験林の位置図

表-38 試験林の概要

記号	所在地	林齢	品種名	立木密度 (本/ha)	平均DBH (cm)	平均樹高 (m)
A	湯布院町	22	ヤブクグリ (*)	1500	17.6	14.4
			アヤスギ (*)	1900	17.8	13.5
			オビアカ (*)	800	19.4	15.6
B	九重町	28	ヤブクグリ (*)	2900	17.7	12.8
C	日田市	50	ヤブクグリ (*)	750	38.4	27.2
D	直川村	63	オビアカ (*)	400	55.7	26.4
E	天瀬町	65	アヤスギ	600	39.2	29.0

注：品種名の(*)は、MuPS法に基づき品種同定した品種である。

6.1.2 試験方法

各林分の平均胸高直径に近い3個体（ただし林分Dは2個体）を供試木として伐採した。供試木は、林分A, Bでは地上高0.2mから2mごとに、林分C, D, Eでは地上高0.2mから4mごとに玉切り、地際を1番丸太とし、順次丸太番号をつけた。皮付き丸太の密度およびFFTアナライザー（リオン製シグナルアナライザーSA-77）で縦振動法により測定した一次固有振動数から丸太の動的ヤング率を算出した。

6.2 結果と考察

6.2.1 林齢が異なるスギ品種の動的ヤング率

各品種の丸太番号別の動的ヤング率の測定結果を表-39に示す。各林分の丸太中央の地上高における動的ヤング率は、50年生以上の試験林C, D, Eのそれが林齢の若い試験林A, Bのそれに比べ大きな値を示した。しかし、それぞれの品種ごとに林齢間の値や樹幹高さ方向の変動パターンが異なる傾向にあった。

表-39 丸太番号別の動的ヤング率

記号	品種名	本数	採材寸法 (m)	丸太番号ごとの動的ヤング率 (Gpa)						
				1	2	3	4	5	6	7
A	ヤブクグリ	3	2	2.17	3.02	3.89	4.60	4.92	5.46	
	アヤスギ	3	2	2.92	3.82	4.29	4.54	4.49	4.68	
	オビアカ	3	2	3.84	5.14	5.36	5.51	5.27	5.05	5.29
B	ヤブクグリ	3	2	2.88	3.65	4.30	5.11	4.74	4.94	
C	ヤブクグリ	3	4	4.80	7.17	8.22	9.00	9.03	9.81	12.12
D	オビアカ	2	4	5.00	6.07	6.39	6.39	5.93	6.58	
E	アヤスギ	3	4	7.26	8.52	8.62	8.76	8.64	9.04	10.42

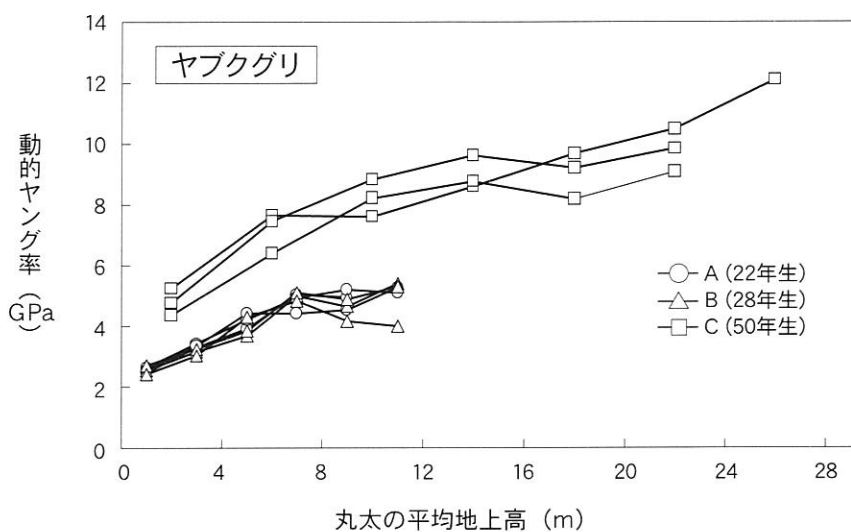


図-31 ヤブクグリの動的ヤング率

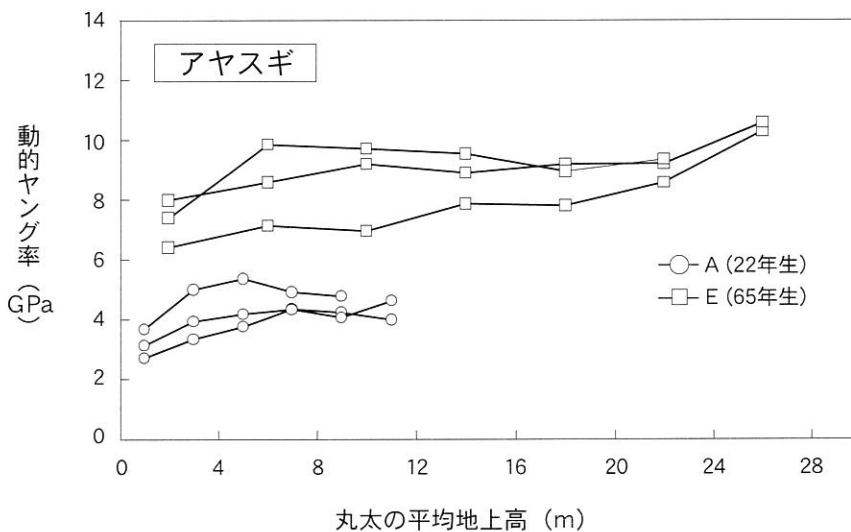


図-32 アヤスギの動的ヤング率

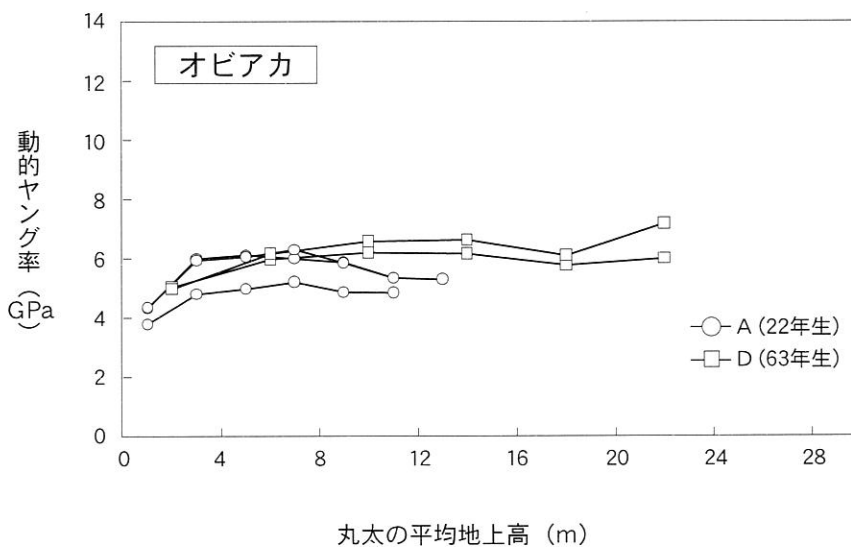


図-33 オビアカの動的ヤング率

そこで、各品種ごとに動的ヤング率を検討した。はじめに、ヤブクグリ3林分の各個体ごとの動的ヤング率を図-31に示す。林分Aおよび林分Bの動的ヤング率は、全個体ともほぼ同じ値を示し、林分間および個体間の差が認められなかった。また、動的ヤング率は丸太の地上高が増すほど直線的に高くなる傾向を示した。一方、林分Cにおいても個体間差は認められず、樹幹高さ方向の動的ヤング率の変動パターンも直線的に顕著に高くなる傾向を示したが、林分A、Bとほぼ平行に高い水準で推移した。

次に、アヤスギ2林分の各個体の動的ヤング率を図-32に示す。林分Aのそれは、ヤブクグリほど顕著ではないが3個体ともほぼ同じ値を示し、丸太の地上高が増すほど緩やかに高くなる傾向を示した。一方、林分Eではやや個体間のバラツキが認められ、樹幹高さ方向の変動パターンはヤブクグリに比べ小さな傾きをとり、おおむね直線的に高くなる傾向を示し、林分Aとほぼ平行に高い水準で推移した。

さらに、オビアカ2林分の各個体の動的ヤング率を図-33に示す。林分Aおよび林分Dのそれは、いずれも林分内の個体間のバラツキは小さく、2番丸太が1番丸太に比べ高い値を示したが、2番丸太以上ではほぼ同じ水準で推移した。しかし、林分Dのそれが林分Aとほぼ同じ値を示し、前述のヤブクグリやアヤスギで認められたような林齢の差が認められなかった。

6.2.2 動的ヤング率の樹高方向変動への林齢の影響

丸太中央の樹幹地上高が2m、5m、10mおよび20mになるように動的ヤング率を平均して求めた各地上高の推定動的ヤング率の林齢間の差を検討した。表-40に示すとおり、ヤブクグリの林分Bの動的ヤング率は、地上高2mでは林分Aの1.26倍とやや高いが、地上高が増すほどその比は減少した。林分Bの林齢が高いにも関わらず、樹幹地上高の高い部位で林分Aより小さな値を示した理由は、林分Bが未間伐林分で立木密度が高く、肥大生長および樹高成長が遅いためと考えられた。次に、林分Cのそれは、各地上高で林分Aのそれぞれ1.86倍、1.69倍、1.58倍と著しく高い値を示した。同様に、アヤスギの林分Eのそれは、各地上高で林分Aのそれぞれ2.16倍、1.91倍、1.88倍と著しく高い値を示した。しかし、オビアカの林分Dのそれは、各地上高で林分Aのそれぞれ1.11倍、1.08倍、1.24倍とわずかに高い値であった。

以上のことから、スギ在来品種3品種の丸太の動的ヤング率は、品種間でその値と樹幹高さ方向の変動パターンが異なることが示唆された。また、丸太の動的ヤング率に及ぼす林齢の影響が品種ごとに異なり、ヤブクグリとアヤスギは林齢が高いほどそれも高い特性の品種であり、オビアカは22年生と63年生の間に大きな差がない特性の品種であると推察された。

6.3 結論

ヤブクグリ、アヤスギおよびオビアカの主要スギ在来3品種を対象に、丸太動的ヤング率へ及ぼす林齢の影響について検討した。主な結果は、次のとおりであった。

- (1) ヤブクグリ、アヤスギおよびオビアカの3品種の丸太動的ヤング率は、各地上高の平均値と樹高方向変動パターンが品種ごとに異なった。
- (2) 丸太動的ヤング率に及ぼす林齢の影響は、品種内の個体間差が小さく、品種間では異なる傾向を示した。
- (3) 地上高2m、5m、10mにおける50年生のヤブクグリの樹幹の動的ヤング率は、22年生に比べそれぞれ1.86倍、1.69倍、1.58倍と著しく高かった。同様に65年生のアヤスギのそれは、22年生に比べそれぞれ2.16倍、1.91倍、1.88倍と著しく高く、63年生のオビアカのそれは22年生に比べそれぞれ1.11倍、1.08倍、1.24倍とわずかに高かった。

表-40 各地上高における動的ヤング率の推定値

品種名	試験林		各地上高の動的ヤング率推定値 (GPa)			
	記号	林齢	2 m	5 m	10m	20m
ヤブクグリ	A	22	2.59	3.89	5.19	
	B	28	3.26 (1.26)	4.30 (1.11)	4.84 (0.93)	
	C	50	4.80 (1.85)	6.57 (1.69)	8.22 (1.58)	9.42
アヤスギ	A	22	3.37	4.29	4.59	
	E	65	7.26 (2.16)	8.21 (1.91)	8.62 (1.88)	8.84
オビアカ	A	22	4.49	5.36	5.16	
	D	63	5.00 (1.11)	5.80 (1.08)	6.39 (1.24)	6.26

注：動的ヤング率推定値の（ ）は、A林分に対する比を示す。

スギ樹幹の強度性能が仮道管二次壁中層のミクロフィブリル傾角や密度に強く影響されると考えられていることから、今後はそれらと樹幹の動的ヤング率との関係について、それぞれの品種ごとに検討する必要がある。

以上のことから、各品種の丸太動的ヤング率は、その値と樹高方向変動パターンに品種特性が認められ、ヤブクグリやアヤスギでは林齢が高くなるほど値は大きくなり、オビアカでは林齢間に大差なく、林齢の影響が品種間で異なることが判明した。したがって、品種が同じで同一径級であっても、丸太動的ヤング率は間伐材と主伐材で大きく変動することもあると推察された。

第 7 章 総 合 考 察

スギおよびヒノキの品質管理型林業を行う際に必要となる基本的な木材性質を把握するとともに、その木材性質へ及ぼす遺伝的要因である品種・クローンあるいは環境要因である森林施業の影響について検討した。

まず、実生林とさし木林における木材性質の林分内変動を把握することを目的とし、大分県下の実生ヒノキ3林分とさし木のナンゴウヒ2林分を対象として、あらかじめ、RAPD分析を行い、実生林であるかクローン林であるかを確認し、成長量ならびに、丸太の動的ヤング率および胸高部位の生材含水率、容積密度、心材色、仮道管長、曲げヤング率、曲げ強さの林分内変動について検討した(2005, 2006)^{25, 26)}。

次に、スギ在来品種の成長と木材性質を明らかにすることを目的とし、大分県湯布院町の西日本主要スギ品種展示林に植栽されている27品種の内、あらかじめMuPS型データベースと照合し同定された九州産16品種(イワオ, ナカムラ, ヒノデ, タケノサコ, ヤマグチ, クモトオシ, ヤイチ, ガリン, エダナガ, オオノ, アカバ, オビアカ, ヤブクグリ, メアサ, アヤスギ, ホンスギ)の成長量および生材含水率、材色、容積密度、丸太の動的ヤング率、力学的性質を把握するとともに、各木材性質の品種間差および個体内変動について検討した(2005a)⁶²⁾。

ついで、ヒノキ精英樹クローンの木材性質を把握することを目的とし、大分県天瀬町のヒノキ精英樹クローン集植所に植栽されている九州産ヒノキ精英樹50クローンを対象とし、丸太の動的ヤング率、容積密度、生材含水率、材色の個体内変動およびクローン間差について検討した(2004)²⁴⁾。

次に、スギ品種の成長と木材性質に及ぼす森林施業の影響を明らかにすることを目的とし、大分県九重町の地蔵原スギ品種別・植栽密度別試験林に3つの植栽密度で植栽されている10品種を対象とし、MuPS型データベースと照合し同定された6品種(イワオ, ヒノデ, ヤマグチ, ヤイチ, シャカイン, ヤブクグリ)の成長量および生材含水率、材色、容積密度、丸太の動的ヤング率、力学的性質の品種間差、植栽密度間差および樹幹内変動について検討した(2005b, 2006)^{63, 64)}。

最後に、スギ品種の木材性質に及ぼす森林施業(林齢)の影響を明らかにすることを目的とし、大分県下の間伐期と主伐期にあたるヤブクグリ, アヤスギおよびオビアカのスギ3品種5林分を対象とし、木材性質(丸太動的ヤング率)の林齢間変動について検討した。

以下に、本研究によって得られた結論を述べる。

1. 実生林とさし木林における木材性質の林分内変動を把握することを目的とし、実生ヒノキ3林分60個体およびさし木のナンゴウヒ2林分40個体を用いて実験を行った。

さし木のナンゴウヒ林は、実生林に比べ、胸高直径のバラツキが小さかった。また、ナンゴウヒ林における木材性質の林分内変動は、実生林に比べ、心材の生材含水率および心材色が小さい傾向にあり、辺材の生材含水率、容積密度、仮道管長および力学的性質が著しく小さかった。また、ナンゴウヒ林は、実生林に比べ晩材仮道管長が長く、その変動係数が小さかった。丸太の動的ヤング率は、樹高方向の変動パターンが実生ヒノキとナンゴウヒで異なり、ナンゴウヒの個体内変動が小さかった。これらのことから、さし木のナンゴウヒ林は、実生林に比べ、木材性質のバラツキが小さいことが明らかとなった。

したがって、用途に適した性質を持つ個体を選抜・増殖・供給できるという点で、クローン林業の有益性が高いことが示された。

2. スギ在来品種の成長と木材性質を明らかにすることを目的とし、MuPS分析によるDNA鑑定で品種を同定した九州産スギ在来品種16品種48個体を用いて実験を行った。

スギ在来品種16品種は、それぞれ品種に特有な成長型を示した。心材の生材含水率と心材色の L^* 値、 a^* 値の品種内変動は小さく、品種間に統計的な差が認められ、品種固有の性質と考えられた。容積密度と丸太の動的ヤング率も品種間で異なり、早生型品種に比べ中生型および晩生型品種は容積密度が高く、動的ヤング率が低かった。動的ヤング率の樹高方向変動には、地上高が高くなるにつれ増加するパターンと1番丸太が最も低くそれより上部ではやや高い値で比較的安定するパターンが認められ、前者が中生型あるいは晩生型品種で、後者が早生型品種であった。曲げ試験の荷重-たわみ線図は、品種あるいは成長型ごとに異なった。

以上のように、成長および測定した木材性質の多くにおいて、品種の特性が認められた。とくに、建築用材として要求される強度性能が優れ、さらに加工段階で問題となる乾燥性に影響する心材含水率が低い品種を選択することによって、加工や利用の場面で有利な木材供給が可能となる点において、用途に適した遺伝的形質をもつスギ品種を用いた品質管理型林業の有効性が明らかとなった。

3. ヒノキ精英樹クローンの木材性質を把握することを目的とし、ヒノキ精英樹50クローン50個体を用いて実験を行った。

全クローンの丸太動的ヤング率の変動係数は、いずれの丸太番号も大差なく、概ね10%前後であった。また、樹高方向の動的ヤング率の変動パターンは、ほとんどのクローンで1番丸太が低く、2番丸太が最大で、それより上部では漸減する傾向にあったが、異なる変動パターンを示すクローンも存在した。全クローンの胸高部位円盤の容積密度は、変動係数が6.6%であり、比較的バラツキが小さかった。また、放射方向および樹高方向の変動パターンに一定の傾向が認められた。一方、心材の生材含水率は、平均値が34%と低く、クローン間のバラツキが小さかった。

次に、各クローンの成長特性と木材性質の測定値を用いて主成分分析による優良クローンの検討を行ったところ、成長量および幹や枝の形態特性よりも動的ヤング率および容積密度の寄与率が大きく、5つの優良グループに分類可能であった。

以上のことから、心材含水率を除く木材性質において、ヒノキクローンは、スギ品種と同様に、木材性質の値とその樹幹内変動にクローンの遺伝性が影響していると考えられた。

4. スギ品種の成長と木材性質に及ぼす森林施業（植栽密度）の影響を明らかにすることを目的とし、1500本/ha、3000本/ha、5000本/haの3つの異なる密度で植栽されたスギ在来品種6品種54個体を用いて実験を行った。

イワオ、ヒノデ、ヤマグチ、ヤイチ、シャカインおよびヤブクグリの6品種は、品種および植栽密度によって肥大成長と材積成長に顕著な差が認められた。また、測定したすべての木材性質に顕著な品種間差が認められた。生材含水率は心材、辺材ともに植栽密度が高いほど低くなり、心材含水率の樹幹高さ方向の変動パターンには影響は認められなかった。容積密度は植栽密度の高い試験区ほどわずかに高かった。心材色の L^* 値は植栽密度の高い試験区ほど大きく、逆に a^* 値は小さかった。ヤブクグリを除く5品種の丸太の動的ヤング率、縦圧縮強さ、曲げヤング率は、植栽密度の高い試験区ほどわずかに大きな値を示したが、丸太動的ヤング率の樹幹高さ方向の変動パターンに及ぼす植栽密度の影響は認められなかった。

このように、スギの木材性質に対しては品種すなわち遺伝的要因の影響が極めて大きいことが確認されたが、植栽密度の違いによる影響が品種によって異なることが明らかになった。したがって、植栽密度などの森林施業が木材性質へ強く影響する品種では、森林施業方法にも考慮しなければならないと考えられた。

5. スギ品種の木材性質に及ぼす森林施業（林齢）の影響を明らかにすることを目的とし、間伐期と主伐期にあたるヤブクグリ、アヤスギおよびオビアカのスギ3品種5林分を対象とし、木材性質（丸太動的ヤング率）の林齢間変動について検討した。

ヤブクグリ、アヤスギおよびオビアカの丸太動的ヤング率は、品種内の個体間差が小さく、その値と樹高方向変動パターンが品種ごとに異なった。22年生と50年生以上の丸太動的ヤング率の比は、いずれの地上高においてもヤブクグリ（1.6-1.9倍）とアヤスギ（1.9-2.2倍）が顕著に大きかったが、オビアカ（1.1-1.2倍）は小さかった。つまり、丸太動的ヤング率の値と樹高方向変動パターンには品種特性が認められ、ヤブクグリやアヤスギでは林齢が高くなるほど値は大きくなり、オビアカでは林齢間に大差なく、林齢の影響が品種間で異なることが判明した。したがって、品種が同じでしかも同一径級であっても、丸太動的ヤング率は間伐材と主伐材で大きく変動することもあると推察された。

以上、本研究より、スギおよびヒノキの品質管理型林業を実践する際に必要となるそれらの成長と木材性質の樹幹内変動、林分内変動、林分間変動および種内変動が明らかとなり、それらに影響する遺伝的要因である品種・クローンや環境要因である植栽密度・林齢との関係が明らかとなった。

謝 辞

本研究報告は、九州大学から平成18年3月27日に農学博士を授与される際に提出した博士論文に多少加筆したものである。

まず、本研究の遂行ならびに論文の作成に当たり、懇篤なご指導を賜りました九州大学大学院農学研究院 小田一幸教授に深く感謝の意を表します。

また、本論文のとりまとめに際し、多くの貴重な御意見、御指導を賜りました九州大学大学院農学研究院 白石 進教授、古賀信也助教授、松村順司助教授、長谷川益己助手に深く感謝の意を表します。

さらに、本研究の遂行に際し、快く試験木を提供していただいた大分県、湯布院町、九重町、安達智徳氏および田島東吾氏、試験林の調査や試験木の採取に御協力いただいた大分県林業技術職員の方々、大分県内の森林組合職員の方々をはじめ、これまで試験林の設定および維持に係わってこられた関係者の方々に厚くお礼申し上げます。

おわりに、現地調査や測定等にあたって、大分県農林水産研究センター林業試験場の安東俊剛場長、小野裕一部長（現；林産振興室）、河津渉主幹研究員、城井秀幸主幹研究員、豆田俊治研究員（現；林産振興室）、山田康裕研究員、青田勝研究員、小野美年技師、井上克之技師、金古美輝夫技師、奥松宗雄氏に御協力を頂きました。測定と図表整理等には、坂口里美、穴井真由美の両女史の手を煩わしました。また、九州大学大学院農学研究院森林資源科学部門森林機能開発学講座木質資源科学研究室ならびに造林学研究室の松永浩史（現；森林総合研究所）、久枝和彦、梅林利弘、藤岡良江、福永大介、阪上宏樹、井上真由美、加治里佳子、米木剛史、奥永博幸、荒木美智子、村上篤史、田上美里の学生諸氏に現地調査、DNA

鑑定および測定を協力していただいた。これらの各位に対し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 宮島寛：“九州のスギとヒノキ”，九州大学出版会，福岡，275pp，(1989)
- 2) 白石 進：“木材の科学と利用技術Ⅱ，5. スギ”，日本木材学会研究分科会報告書，1-9 (1991)
- 3) 小田一幸：スギの品種と材質，木材工業，55 (2)，50-54 (2000)
- 4) 高田克彦，白石進：DNA型によるスギ精英樹の再整理－在来品種との結合を含めて－，日本林学会論文集，106，255-256 (1995)
- 5) 久枝和彦，白石進，栗延晋，宮原文彦，石松誠，家入龍二，佐々木義則，三樹陽一郎，川内博文：MuPSによる九州のスギ品種の分類－九州産スギ精英樹と在来品種の再整理－，第111回日本林学会大会学術講演集，242 (2000)
- 6) 堤壽一：林木の生長と木材性質，第34回日本木材学会大会研究発表要旨集，391-392 (1984)
- 7) 堤壽一：木材材質とその意義－林業と木材工業の接点を求めて－，木材工業，41，460-465 (1986)
- 8) 堤壽一：木材利用に適合させる材質の視点，林木の育種，164，8-11 (1992)
- 9) 小田一幸：木材利用からみた林木育種への期待，林木の育種，「特別号」'95，38-41 (1995)
- 10) 塩川彰：ナンゴウヒノキなどヒノキの挿木造林について，フォレストコンサル，30，2-12 (1986)
- 11) 諫本信義：ヒノキ新時代の幕開け：小型さし穂による大量増殖と優良クローンの選抜について，大分県林業試験場研究時報，25，1-17 (1998)
- 12) 池田潔彦，金森富士雄，有馬孝禮：応力波伝播速度による立木材質の評価と適用（第4報）ヒノキ林分立木材質の評価，木材学会誌，46 (6)，602-608 (2000)
- 13) 池田潔彦：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 (8)，365-371 (2001)
- 14) 池田隆，錦織勇：島根県産ヒノキ材の材質特性と強度特性，島根県林業技術センター研究報告，51，47-54 (2000)
- 15) 太田貞明：スギ・ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学特性に関する基礎的研究，九州大学農学部演習林報告，45，1-80 (1972)
- 16) 大塚康史，東山貢：和歌山県産スギ・ヒノキの2，3の形質（第1報），和歌山県林業センター研究報告，4，16-20 (1993)
- 17) 大森昭壽，池田潔彦：静岡県産材の材質と強度性能（Ⅱ）ヒノキ材の材質と強度性能，静岡県林業技術センター研究報告，21，59-70 (1993)
- 18) 古賀信也，古賀英明，小田一幸，堤壽一：同一林分で生育したヒノキの木材性質のバラツキ，日本林学会九州支部研究論文集，43，223-224 (1990)
- 19) 古賀信也，小田一幸，堤壽一，古賀英明：ヒノキおよびカラマツ人工造林木の木材性質のバラツキ－林分内のバラツキ－，九州大学農学部演習林報告，66，55-68 (1992)
- 20) 藤原新二，岩神正朗：スギおよびヒノキ材の生材含水率，高知大学学術研究報告，37，169-178 (1988)
- 21) 湊克之，氏家雅男，菱沼勇之助：和歌山地方演習林産スギ・ヒノキ植栽木の生長と材質，北海道大学農学部演習林報告，46 (2)，223-247 (1989)
- 22) 池田潔彦，大森昭壽：次代検定林におけるヒノキ精英樹家系の材質と強度性能－設定20年目に伐倒した間伐木の調査結果－，静岡県林業技術センター研究報告，22，19-29 (1994)
- 23) 岩崎充則：ヒノキ精英樹の材質特性－家系と検定林の違いによるヤング率と容積密度の変異－，長崎県総合農林試験場研究報告，32，17-22 (2002)

- 24) 津島俊治, 松村順司, 小田一幸: ヒノキ精英樹クローンの材質特性, 九州森林研究, 57, 167-173 (2004)
- 25) 津島俊治, 藤岡良江, 松村順司, 小田一幸: ヒノキ木材性質の林分内変動, 九州森林研究, 58, 88-90 (2005)
- 26) 津島俊治, 藤岡良江, 小田一幸, 松村順司, 白石進: 実生ヒノキとナンゴウヒの木材性質, 木材学会誌, 投稿中 (2006)
- 27) 宮崎安貞, 宮島寛: パーオキシダーゼ・アイソザイムを利用したスギさし木品種の同定, IUFRO論文集, XVII, 214-217 (1981)
- 28) 佐藤朗, 佐々木義則: 林木のアイソザイムに関する研究 (I) -スギおよびヒノキ倍数体のアイソザイム-, 大分県林業試験場研究時報, 10, 11-15 (1984)
- 29) 高田克彦, 白石進: RAPDマーカーを用いた九州地方のスギさし木品種の分類, 九州大学農学部演習林報告, 75, 1-14 (1996)
- 30) 久枝和彦, 白石進: DNA分子マーカーを用いた簡便なスギ品種の分類・同定法の開発-RAPD-SCARマーカーのマルチローカス分析-, 日本林学会九州支部研究論文集, 52, 49-50 (1999)
- 31) 久枝和彦, 白石進, 栗延晋: MuPS (Multiplex-PCR of SCAR markers) 分析を用いた九州産スギ精英樹の識別, 日本林学会九州支部研究論文集, 53, 55-56 (2000)
- 32) 久枝和彦, 白石進, 藤澤義武, 宮原文彦, 石松誠, 家入龍二, 佐々木義則, 三樹陽一郎, 川内博文: 九州産スギ在来品種および精英樹のMuPS (multiplex-PCR of SCAR markers) 型, 九州大学農学部演習林報告, 84, 59-71 (2003)
- 33) 諫本信義, 津島俊治, 亀井淳介: スギ主伐木の生長と材質: 心持ち材, 心去り材の品種別, 部位別の強度特性, 大分県林業試験場研究時報, 25, 64-69 (1998)
- 34) 小田一幸, 古賀信也, 堤壽一: 材質育種にむけてのスギ品種の年輪構造, 九州大学農学部演習林報告, 58, 109-122 (1988)
- 35) 小田一幸, 久田義則, 堤壽一: 同一林分で生育したスギ品種内の木材性質のバラツキ, 九州大学演習林報告, 60, 69-81 (1989)
- 36) 小田一幸, 渡部演一, 堤壽一: 構造部材を意識したスギ12品種の木材性質-スギ材材質評価法確立を目指して-, 九州大学農学部演習林報告, 62, 115-126 (1990)
- 37) 小野和雄: 日田スギ間伐材ば品種別材質特性について (II) -17品種未成熟材の力学的指標に影響をおよぼす組織・構造因子-, 日本林学会九州支部研究論文集, 41, 227-228 (1988)
- 38) 亀井淳介, 津島俊治: スギ立木の水分分布について, 日本林学会九州支部研究論文集, 41, 221-223 (1988)
- 39) 河澄恭輔, 小田一幸, 堤壽一: 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-, 九州大学農学部演習林報告, 64, 29-39 (1991a)
- 40) 河澄恭輔, 小田一幸, 堤壽一: 同一林分で生育したスギ品種の心材含水率, 九州大学農学芸誌, 46 (1・2), 79-84 (1991b)
- 41) 小泉章夫, 飯島泰男, 佐々木貴信, 川井安生, 岡崎泰男, 中谷浩: 秋田県産スギ材の強度特性 (第1報) 丸太ヤング率, 木材学会誌, 43 (1), 46-51 (1997)
- 42) 古賀信也, 小田一幸, 堤壽一: スギ品種内の木材性質のバラツキ, 九州大学農学部演習林報告, 62, 101-113 (1990)
- 43) 佐々木光, 角谷和男, 瀧野真二郎: スギ36品種の力学的性質, 木材研究資料, 17, 192-205 (1983)
- 44) 朱健軍, 高田克彦, 飯島泰男, 平川泰彦: 秋田県産スギ造林木の生長と材質 (第1報) 材質の樹幹

- 内変動, 木材学会誌, 49 (2), 138-145 (2003)
- 45) 津島俊治：スギ品種間における材質の差異 (I), 日本林学会九州支部研究論文集, 41, 245-246 (1988)
- 46) 津島俊治, 小野美年：スギ品種間における材質の差異 (II), 日本林学会九州支部研究論文集, 42, 277-278 (1989a)
- 47) 津島俊治, 諫本信義：スギ主伐材の成長と材質 (I) - ヤブクグリ主伐材について -, 日本林学会九州支部研究論文集, 42, 283-284 (1989b)
- 48) 長尾博文, 見尾貞治, 堤壽一：スギ造林木の木部形成パターンと年輪構造 - クモトオシとヤブクグリについて -, 九州大学農学部演習林報告, 55, 201-211 (1985)
- 49) 中田了五, 藤澤義武, 平川泰彦, 山下香菜：スギの生材含水率の個体内樹高方向での変化, 木材学会誌, 44 (6), 395-402 (1998)
- 50) 平川泰彦, 藤澤義武, 中田了五, 山下香菜：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, 森林総合研究所研究報告, 386, 31-41 (2003)
- 51) 藤崎謙次郎, 渋谷昌資：スギ品種における組織構造と材質との関係 (I) - クモトウシ, ヤイチ, ヤブクグリおよびメアサについて -, 愛媛大学農学部演習林報告, 24, 61-70 (1986)
- 52) Fujisawa Y., Ohta S., Nishimura K., Tajima M. : Wood Characteristics and Genetic Variations in Sugi (*Cryptomeria japonica*) .-Clonal differences and correlations between locations of dynamic moduli of elasticity and diameter growths in plus-trees clones.-, *Mokuzai Gakkaishi*, 38 (7), 638-644 (1992)
- 53) Fujisawa Y., Ohta S., Tajima M. : Wood Characteristics and Genetic Variations in Sugi (*Cryptomeria japonica*) II.-Variation in growth ring components among plus-trees clones and test stands.-, *Mokuzai Gakkaishi*, 39 (8), 875-882 (1993)
- 54) 藤澤義武, 太田貞明, 西村慶二, 戸田忠雄, 田島正啓：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 (1995a)
- 55) 藤澤義武, 太田貞明, 明石孝輝：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), 631-639 (1995b)
- 56) 見尾貞治, 長尾博文, 堤壽一：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 -, 九州大学農学部演習林報告, 55, 213-222 (1985)
- 57) 三輪雄四郎：スギの品種別材質試験 (1) - 生材含水率について -, 第33回日本木材学会大会要旨集, 京都, 1983, p.31
- 58) 森川岳, 小田一幸, 松村順司, 堤壽一：スギ樹幹における黒心材形成と灰分 (第2報) スギ3品種心材の性質, 九州大学農学部演習林報告, 74, 41-49 (1996)
- 59) 矢幡久, 宮島寛, 西林寺隆, 古家宏俊, 児玉貴, 汰木達郎, 山本福寿, 久保田茂, 渡部桂, 野上寛五郎, 黒木晴輝：六演習林スギ品種試験地のスギ在来品種および精英樹クローン間の材質変動, 九州大学農学部演習林報告, 57, 149-173 (1987)
- 60) 山下香菜, 平川泰彦, 藤澤義武, 中田了五：スギ18品種の丸太ヤング率の品種間差に及ぼすマイクロフィブリル傾角と密度の影響, 木材学会誌, 46 (6), 510-522 (2000)
- 61) 林野庁：スギ品種の材質特性の評価, 林業試験研究報告書, 36, 59-117 (1997)
- 62) 津島俊治, 古賀信也, 小田一幸, 白石進：九州産スギ在来品種の成長と木材性質, 木材学会誌, 51(6), 394-401 (2005a)
- 63) 津島俊治, 古賀信也, 小田一幸, 白石進：スギ在来品種の成長量と動的ヤング率へ及ぼす植栽密度の影響, 九州森林研究, 58, 95-100 (2005b)

- 64) 津島俊治, 古賀信也, 小田一幸, 白石進: スギ在来品種の成長と木材性質へ及ぼす植栽密度の影響, 木材学会誌, 投稿中 (2006)
- 65) Zobel B.J., van Buijtenen: “*Wood Variation. Its Causes and Control*”, Springer-Verlag, 363pp, Berlin (1989)
- 66) 岩神正朗, 藤原新二: 保育形式の異なるスギ造林木の生長と材質 (II) -生長量の比較-, 日本林学会論文集, 97, 167-168 (1986)
- 67) 大塚誠, 中村徳孫, 野上寛五郎: 枝打ちの材質に及ぼす影響 (VII) -肥大生長・伸長生長への枝打ち率等の影響-, 日本林学会論文集, 99, 403-404 (1988)
- 68) 古賀信也, Zhang,S.Y.: バルサムファーの成長と材質におよぼす間伐の影響, 第50回日本木材学会大会研究発表要旨集, 595 (2000)
- 69) 永井智, 山田範彦, 村上浩二: 無手入れスギ林の間伐木の材質, 第47回日本木材学会大会研究発表要旨集, 519 (1997)
- 70) Wang S.Y., Chen K.N.: Effects of Plantation Spacings on Tracheid Lengths, Annual-Ring Widths, and Percentages of Latewood and Heartwood of Taiwan-Grown Japanese Cedar., *Mokuzai Gakkaishi*, 38 (7), 645-656 (1992)
- 71) Wang S.Y., Lin S.H.: Effects of Plantation Spacings on the Quality of Visually Graded Lumber and Mechanical Properties of Taiwan-Grown Japanese Cedar., *Mokuzai Gakkaishi*, 42 (5), 435-444 (1996)
- 72) 白石進・渡辺敦史: rbcL遺伝子多型を利用したアカマツとクロマツの葉緑体ゲノム識別, 日本林学会誌, 77, 429-436 (1995)
- 73) Williams, J.G.K., Kubarik, A.R., Livak, K.J., Rafalski, J.A., and Tingey, S.V.: DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers, *Nucleic Acids Res.* 18, 6531-6535 (1990)
- 74) 川野洋一郎: シリーズ林業解説スギ品種の特性 (5), 林試だより (大分県), 16, (1981)
- 75) 大分県林業水産部: “すぎ人工林収穫予想表”, 大分県, 170pp, 大分 (1982)
- 76) 平川泰彦, 藤澤義武: 精英樹スギクローンにおける晩材仮道管S2層のマイクロフィブリル傾角と仮道管長との関係, 木材学会誌, 41 (2), 123-131 (1995)
- 77) 平川泰彦, 藤澤義武: スギの晩材仮道管S2層のマイクロフィブリル傾角の樹高方向における変動, 木材学会誌, 42 (2), 107-114 (1996)
- 78) 平川泰彦, 山下香菜, 中田了五, 藤澤義武: スギ丸太のヤング率の変動に関わる晩材仮道管S2層のマイクロフィブリル傾角と密度の影響, 木材学会誌, 43 (9), 717-724 (1997)
- 79) 佐藤大七郎: ”育林”, 文永堂, 280pp, 東京 (1983)
- 80) 伏谷賢美, 木方洋二, 岡野健, 佐道健, 竹村富男, 則元京, 有馬孝禮, 堤壽一, 平井信之: ”木材の物理”, 文永堂, 280pp, 東京 (1985)
- 81) 中谷浩: 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究, 富山県林業技術センター研究報告, 4, 1-54 (1991)

大分県農林水産研究センター林業試験場研究報告 第16号

品質管理型林業の実践に向けた
スギおよびヒノキの成長と木材性質に関する研究

平成18年3月15日 発行

編集 大分県農林水産研究センター林業試験場

〒877-1363

大分県日田市大字有田字佐寺原

TEL 0973-23-2146

FAX 0973-23-6769

E-MAIL : rinsi@fat.coara.or.jp

<http://www.coara.or.jp/~rinsi/index.htm>

印刷 尾花印刷有限公司 日田市田島本町8-8