

研究論文

スギ林木の肥大成長速さと木材材質

白井真紀¹⁾・北原龍士²⁾

¹⁾ アイン・エンジニアリング (株), ²⁾ 宮崎大学農学部森林科学講座

(2009年11月26日 受理)

The Effect of Radial Growth Rate on the Wood Properties of *Cryptomeria japonica*

Maki SHIRAI¹⁾ and Ryushi KITAHARA²⁾

¹⁾ Ein Engineering Co. Ltd.

²⁾ Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki

Summary : The effect of rate of radial (diameter) growth on the wood properties was examined at breast height (1.5 m) in 30-year-old *Cryptomeria japonica* plantation trees grown on the same site. The patterns of radial variation with age and distance from the pith for tracheid length, microfibrill angle, percentage of cell-wall area, strength and elasticity in compression parallel to the grain and shrinkage were compared for the fast-, normal- and slow-grown trees, respectively.

It has long been generally accepted that in timber from fast-grown plantations there is an association between wide growth rings and low strength in conifers. However, wood from fast-grown trees was not necessarily poor wood. The accelerated growth led to the greater proportion of mature wood with stable high-quality wood. In addition, the assessment of radial wood variation with distance from the pith was rather essential in wood utilization in contrast with that for the variation with age.

Key words : *Cryptomeria japonica*, Juvenile and mature wood, Radial growth rate, Radial wood variation, Wood properties.

1. まえがき

世界的な森林資源の枯渇, 加えて地球環境保全の視点から, 人工造林木をいかに育て, 使いこなすかが国際的な課題として浮上してきた。また, 昨今, 森林資源である木材に, より高度な利用と加工処理性が要求されるようになってきた。つまり, 人工造林木の利用が主流の時代に向けて, 学術情報の集積が急務となっている。

宮崎県は, その地域特性として, 温暖・多雨な気候のために, わが国でも有数の森林資源に恵ま

れた地域である。スギ品種の中でも, とりわけオビスギ群は, 成長が速いことで知られている。かつてオビスギは, 疎植で育て, その成長の速さを活かして肥大成長をうながし, 船舶用材, いわゆる弁甲材として利用されてきた。今日では, 密植で育ててその肥大成長を抑制し, 心持ち柱材として使われている。しかし, その需要は衰退の一途をたどっている。そこで, 飢肥林業の将来を考えると, オビスギのもつ特徴を最大限活かすことができないだろうか。このことは, オビスギのみ

にかかわらず，わが国のスギ林業に共通する課題であり，スギの特徴である『成長の速さ』を武器に，その可能性を広げたい．林木の肥大成長が速く，材積成長量が大きいことは，短期間で利用できる成木を得ることが可能になり，木材利用上，好都合である．

従来，林木の肥大成長速さが大きくなると，年輪幅が広くなり，木材の品質は劣るという考え方が支配的であった（たとえばDinwoodie 1961など）．しかし，昨今，内外の研究成果（Bamber *et. al.* 1983；Zobel *et. al.* 1989；Wilkins 1991b；Herman *et. al.* 1998a, 1998b；北原ら 2000など）から，木材の組織・構造的な材質指標，そして力学的性能および物理的性能への肥大成長速さの影響が明らかにされつつあり，従来の通念に対して疑問が投げかけられている．また，海外の林業先進国では，高度育成林業，すなわち利用目的にかなった高品質の木材を林業によって生産し，効率よく木材工業によって利用するシステムがすでに実現されている．そこでは，林木の『成長の速さ』が重要なキー・ワードとなっている．一方，わが国では，前述の考え方が一般的であり，林木の成長速さと木材材質との関連性を追究した研究は極めて低調である．

この研究では，林木生産と木材利用の効率化を図るために，スギ人工造林木の肥大成長速さに着目して，おもに木材の材料的性能に関連する材質指標への肥大成長速さの影響を究明することを将来的な目標としたい．そのためには，スギ林木の肥大成長速さに影響をもたらす数多くの要因，たとえば保育作業（植栽密度，間伐，枝打ち，肥培など），スギ品種，環境条件などに詳細な検討を加えなければならない．つまり，スギ林業の実践に研究成果を結び付けるには，今後，多大の労力と時間を要するだろう．そこで，今回は，その前段階として，スギ同一林分内で，林木の個体間競争によってもたらされた肥大成長速さの違いが，木材材質に与える影響を明らかにする．なお，この論文では，「肥大成長速さ」の意味を，つぎのように用いている．つまり，林分を構成する各林木の間で，同じ生育期間（時間）内に，放射方向の積算成長量（距離），すなわち樹幹木部の直径の差として現れる結果を，いわゆる「肥大成長速さ」の違いとして取り扱っている．

2. 実験

2.1 試験木と供試材料

スギ同一林分内で，林木の個体間競争によって生じた肥大成長速さの違いが，木材材質に与える影響を明らかにするために，宮崎大学農学部附属田野演習林内で，同一植栽日（樹齢：30年生），植栽密度：ha当り2,700 - 2,800本，品種名不明，同一環境条件のもとで生育したスギ人工造林木で構成される林分から供試木を得た．この林分は，すでに除伐と間伐を1回ずつ実施した林分である．林木の肥大成長速さの区分には，胸高部位での直径の値（樹皮部分を除く）を用いた．あらかじめ林分内の毎木調査を行って，林分内の平均胸高直径を割り出し，それに該当する標準木を設定して，それより肥大成長の速い林木，標準的な林木，そして遅い林木，それぞれ6本ずつ合計18本を選び出して，実験に供した．その際，成長の速い林木では樹皮部分を除く平均胸高直径（DBH）が25.1 cm，未成熟材部の平均年輪幅（JW）が0.47 mm，成熟材部の平均年輪幅（MW）が0.34 mm，また成長の標準的な林木ではDBH：17.6 cm，JW：0.36 mm，MW：0.20 mm，さらに成長の遅い林木ではDBH：11.4 cm，JW：0.24 mm，MW：0.16 mmであった．なお，この研究では，樹幹内木部の放射方向において，髓から10年輪目までの範囲を未成熟材とし，11年輪目から木部最外層までを成熟材とした．

供試材料には，試験木の地上高1.50 mから2.35 mにあたる部分から，組織・構造的指標測定用（厚さ（繊維方向(L))：10 cm），力学試験用（厚さ(L)：50 cm），収縮率測定用（厚さ(L)：25 cm）のそれぞれの円盤を切り出した．材質試験用の円盤では，仮道管の長さ，細胞壁率，そして平均マイクロフィブリル傾角などの各種の材質指標を測定するために，髓から木部の最外層に至る放射方向の各部位で，すなわちほぼ5年輪ごとに，各年輪内の早材部から晩材部にわたり，連続して試料を採取した．また，力学試験では前述の円盤を用い，材質試験の試料の採取位置に対応させて，髓から木部の最外層に至る放射方向の各部位から，2方まの角棒（放射方向(R)：接線方向(T)：繊維方向(L) = 2 × 2 × 50 cm）を作製した．この角棒から，5 ~ 6個の縦圧縮試験片（L:T:L = 2 × 2 × 8 cm）を，連続して採取した．さらに，

前述の収縮率測定用の円盤から、繊維 (L) 方向収縮率の測定に、髓持ちの厚板 (厚さ (T) : 3 cm, 長さ (L) : 15 cm) を切り出した。また、同円盤から、放射方向 (R) と接線 (T) 方向収縮率測定用に、それぞれ薄円盤 (幅 (T) : 5 cm, 長さ (L) : 3 cm) を得た。

2.2 実験方法

1) 組織・構造的指標の測定

仮道管の長さ：試料を長さ 1 cm 程度のマッチ軸状の薄片にしたあと、シュルツ氏液で処理して、組織を解離した。実体鏡を使って、その試料の観察像の画像取り込みを行い、それに画像解析処理を施して、仮道管の長さを測定した。その際、各年輪番号での測定値は、約 60 本の仮道管を計測し、その平均値で示した。

マイクロフィブリル傾角：木材試料の各年輪内から、厚さ約 50 μm の板目面切片を取り出した。この切片を氷酢酸と過酸化水素水との混合液 (1:1) で処理したあと、Cousins (1972) の方法で、single wall を作成し、偏光顕微鏡を使って平均マイクロフィブリル傾角 (主体は仮道管 2 次壁中層のマイクロフィブリル傾角) を測定した。なお、各年輪番号における測定値は、仮道管約 30 個を計測した平均値である。

細胞壁率：円盤の各年輪内から、横断面薄切片を作り、超広視野光学顕微鏡で画像取り込みを行い、それに画像解析処理を施して、年輪内の細胞壁率分布を測定した。これには、年輪内を放射方向に一定間隔、一定面積にプロットをとり、プロット面積に対する細胞壁実質面積の割合をもとめた。

晩材率：年輪内の晩材部の放射方向の幅と年輪幅との比から、晩材率をもとめた。

なお、円盤の各年輪内から横断面薄切片を作成し、その顕微鏡画像をもとに、年輪幅、そして早材と晩材との区分を明らかにした。また、晩材細胞の判定は、Mork の定義にしたがった。

2) 縦圧縮試験

縦圧縮負荷には、オルセン型強度試験機を使い、変形速度 0.5 mm/min で、2 方まさ目面をもつ気乾状態の試験片 (含水率：約 15%) に対して、繊維方向へ平行に荷重を加えた。試験は、すべて温

度 20、相対湿度 65% の恒温・恒湿室内で実施した。この縦圧縮試験では、試験片の 4 つの側面にはりつけたひずみゲージからひずみ量を、またそのひずみ量に対応した荷重値を、ストレインメーターを用いて、同時に読み取った。そして、縦圧縮強さと縦圧縮ヤング率をもとめた。

3) 収縮率の測定

樹幹内の髓から木部最外層に至る放射方向の各部位で、木材の繊維 (L) 方向、放射 (R) 方向、そして接線 (T) 方向のそれぞれの収縮率を、コンパレタ (精度 : 0.001 mm) を使って測定した。なお、この収縮率は、生材状態から全乾状態までの全収縮率であった。この際、繊維 (L) 方向の収縮率測定には前述の髓持ちの厚板を、放射 (R) 方向と接線 (T) 方向収縮率測定には同じく前述の薄円盤を、それぞれ用いた。

3. 実験結果

3.1 肥大成長速さと組織・構造的指標

成長速さが増大すると、それらの材質指標値が無制限に向上を示すのではなく、特定の成長速さ、すなわち直径 (胸高部位) に達すると、一定になる傾向が認められた。その一例として、成熟材部の仮道管長さ と 胸高部直径 と の 関 係 を、Fig. 1 に示す。この研究では、前述のように、樹幹内木部の放射方向において、髓から 10 年輪目までの範囲

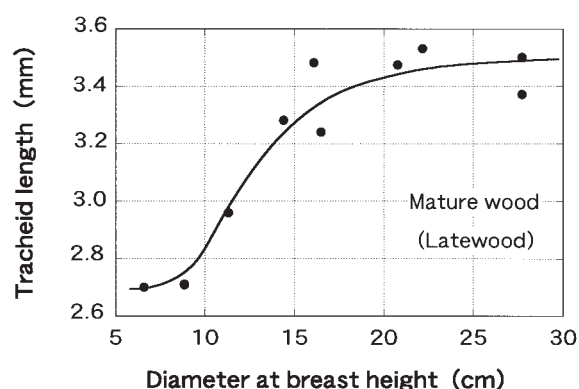


Fig. 1. Effect of radial (diameter) growth rate on the tracheid length in mature wood of even-aged (30 years old) *Cryptomeria japonica* trees. In this study, there was a zone of juvenile wood within the first 10 rings from the pith in a tree, whereas there was mature wood within the bark from the 11th ring. The stem diameters are under bark diameters.

を未成熟材部, 11年輪目以降を成熟材部とした。なお, 一般的には, 林木の生育過程で未成熟期の形成層から形成されて, 幹の内心部の髄からおよそ10~15年輪までに存在する木部を未成熟材, それから外方において成熟期の形成層から形成された木部を成熟材と呼んでいる(渡辺 1978)。

また, Fig. 2 に, 成熟材部における仮道管長さへの年輪幅の影響を示す。この年輪幅の大小は, とりもなおさず肥大成長の速さと同義と考えられる。この図から, 上述の仮道管長さと同様に, 特定の年輪幅に達すると, 仮道管の長さはほぼ一定になることが明らかである。

ところで, 木材が外力を受けるとき, 年輪内の晩材部は, 強固組織あるいは保強組織としての役割を担う。したがって, この晩材部が年輪内で占める割合, すなわち晩材率は木材の力学的性能上, 無視できない。そこで, 成熟材部の晩材率と, 胸

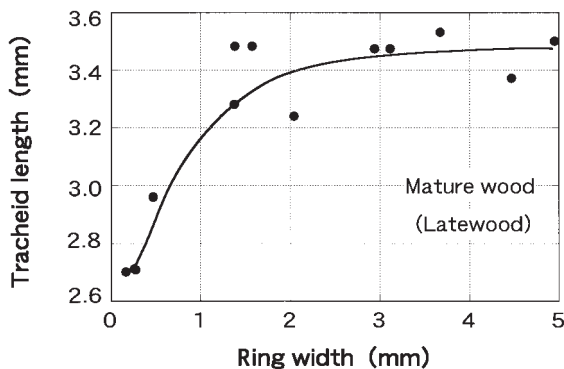


Fig. 2. Relationship of tracheid length and ring width of mature wood (rings 11 through bark) in the trees with different growth rates.

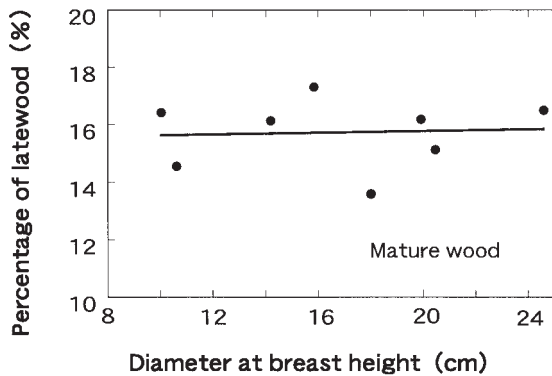


Fig. 3. Effect of radial (diameter) growth rate on the percentage of latewood within a ring of mature wood (rings 11 through bark) in the trees with different growth rates. The stem diameters are under bark diameters.

高部直径, 言い換えれば肥大成長速さとの関係を, Fig. 3 に示す。肥大成長速さが増大しても, 成熟材部の晩材率は一定である。

さて, 肥大成長速さの異なる林木の, 樹幹内の髄から木部最外層に至る放射方向の各部位で, 早材部と晩材部のそれぞれから木材の材料性能に関連する材質指標を広く詳細に調べ, その変動パターンを明らかにした。

まず, 肥大成長速さの異なる林木ごとに, 樹幹内の髄から木部最外層に至る放射方向の各部位で, 細胞形態の代表的な指標である仮道管長さを, 形成層齢(年輪番号)との関連で, Fig. 4~6 に示す。成長速さが標準的な林木と大きな林木では, 成長速さの遅い林木に比べて, 形成層齢が増大すると, 最初の10年輪目付近までは仮道管長さの伸

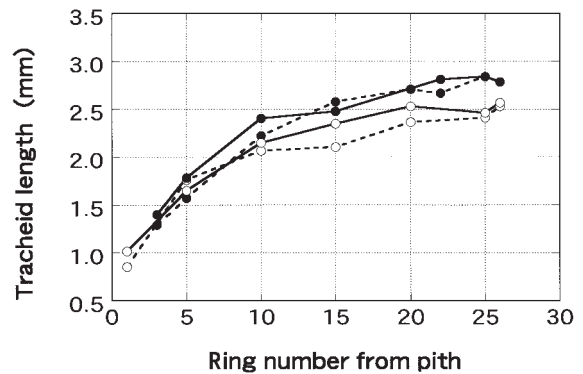


Fig. 4. Variation of tracheid length with age (ring number from pith) in the radial direction in a slow-grown tree of *Cryptomeria japonica*.

---○--- : earlywood A (the one side of pith-to-bark in the radial direction in the stem).
 ---●--- : earlywood B (the opposite side of A side).
 ---○--- : latewood A (the same side of earlywood A).
 ---●--- : latewood B (the same side of earlywood B).

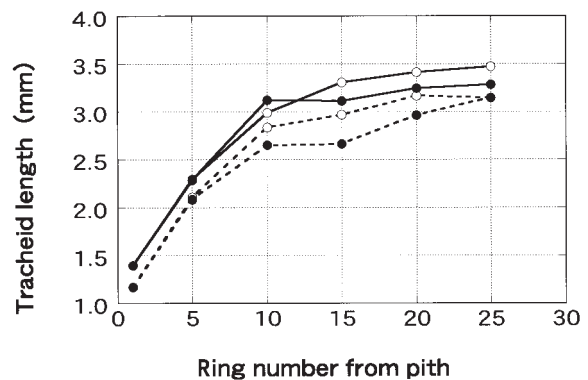


Fig. 5. Variation of tracheid length with age (ring number from pith) in a normal-grown tree. For legends, see Fig. 4.

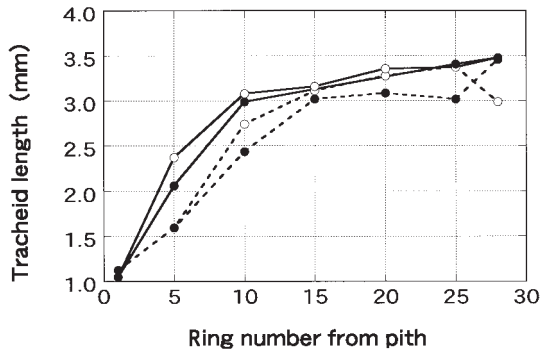


Fig. 6. Variation of tracheid length with age (ring number from pith) in a fast-grown tree. For legends, see Fig. 4.

びがやや大きく、その値も大きかった。しかし、肥大成長速さが異なる林木間では、形成層齢の増大にともなう仮道管長さの変動パターンに、著しい違いは認められなかった。なお、成長速さが大きな林木では、晩材部と早材部の仮道管長さの変動パターンとの間に差異を認めたが、成長速さが遅い林木では認められなかった。

そこで、肥大成長速さの異なる林木ごとに、仮道管の長さを、髄からの距離（放射方向）との関係で調べた。その結果が、Fig. 7～9である。この実験の樹齢（30年生）の範囲内ではあるが、成長の遅い林木（Fig. 7）では、仮道管の長さは、髄からの距離が大きくなると増大するが、一定になる傾向は認められない。対照的に、成長の速い林木（Fig. 9）では、髄からの距離が増大すると、明確に仮道管の長さが一定になる位置（樹幹の半径約6 cm前後）が認められ、しかも安定した仮道管長さの部位が、極めて多く得られている。このような現象は、前述のFig. 4～6に示した仮道管長さとの関係とは、かなり傾向が異なる。加えて、Fig. 7～9の仮道管長さのそれぞれの変動パターンを、すなわちそれぞれの曲線を重ね合わせてみると、ほぼ同じ一つの曲線として重なるようである。つまり、肥大成長速さの異なる林木間では、成長速さの遅速にかかわらず、仮道管長さの変動が大きく不安定な未成熟材部から、仮道管長さが安定した成熟材部に至る材質変動が、ほぼ同じ経過をたどることが判明した。

なお、今回の実験では、林木の肥大成長速さの区分を、成長の速い林木、標準的な林木、そして遅い林木の3段階に設定した。しかし、上述の仮道管長さの変動でも見られたように、成長速さの

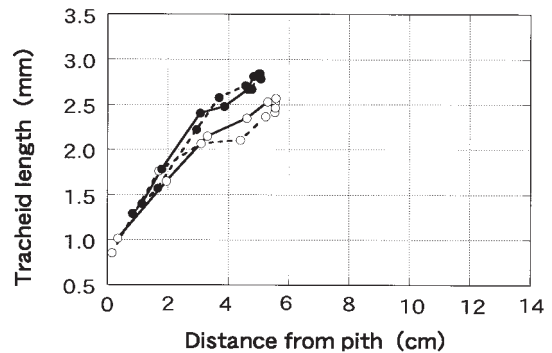


Fig. 7. Variation of tracheid length with distance from pith in a slow-grown tree. For legends, see Fig. 4.

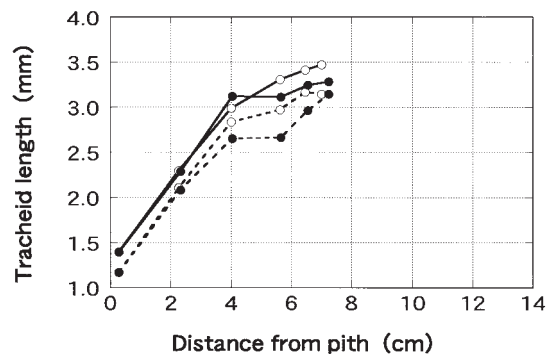


Fig. 8. Variation of tracheid length with distance from pith in a normal-grown tree. For legends, see Fig. 4.

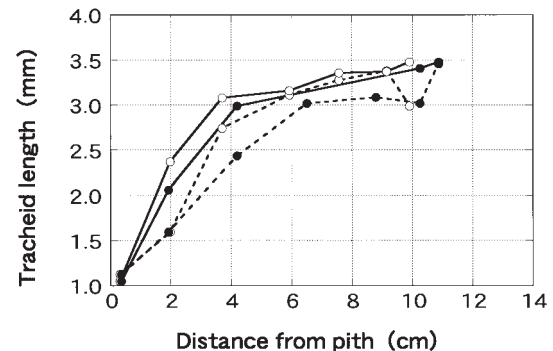


Fig. 9. Variation of tracheid length with distance from pith in a fast-grown tree. For legends, see Fig. 4.

標準的な林木での結果が、成長の速い林木と遅い林木両者の中間的な結果を示したので、後につづく材質指標（細胞壁率を除く）の変動については、すべて成長の速い林木と遅い林木との比較によって検討を加えることにした。

つぎに、仮道管壁の骨格の配列を示す平均マイクロフィブリル傾角（主体は2次壁中層のマイクロフィブリル傾角）と形成層齢との関係を、肥大成長速

さとの関連で、Fig. 10, 11に示している。成長の遅速にかかわらず、いずれの林木も形成層齢が増すと、平均マイクロフィブリル傾角は減少する。成長の速い林木 (Fig. 11) では、約10年でその減少の程度がわずかながら頭打ちになるものの、成長の遅い林木の変動パターンとの間に、それほど大きな差異は認められない。ただ、成長の速い林木では、平均マイクロフィブリル傾角が大きな早材部とそれが小さな晩材部の変動曲線の区分が明瞭である。平川ら (1995) は、林木の形成層齢と木材のマイクロフィブリル傾角との関係を調べ、マイクロフィブリル傾角の値が肥大成長速さに影響を受けないことを述べている。この研究でも、肥大成長速さが異なる林木について、成熟材部のマイクロフィブリル傾角の値を比べてみると、確かに著しい差異は認められず、ほぼ同様の値を示している。

上述のことがらに関連して、平均マイクロフィブリル傾角を髄からの距離との関係でみると、Fig. 12, 13に示すとおりである。平均マイクロフィブリル

ル傾角と形成層齢との関係を表した変動パターン (Fig. 10, 11) とは、大きく傾向が異なる。要するに、平均マイクロフィブリル傾角を髄からの距離との関係でみると、形成層齢との関係に比べて、肥大成長速さの影響が、より顕著に現れる。成長の遅い林木では (Fig. 12)、平均マイクロフィブリル傾角の減少傾向がつづいており、頭打ちになった部位を認めない。しかし、成長の速い林木 (Fig. 13) では、明らかに平均マイクロフィブリル傾角の値が小さく頭打ちになった部位が得られている。

仮道管壁の実質量の目安となる細胞壁率 (佐伯 1962) への形成層齢の影響を、肥大成長速さとの関連で、Fig. 14に示す。この細胞壁率は、相対的に容積密度数と極めて密接に結びつく指標である。これによると、早材部と晩材部の変動パターンは、傾向が全く異なる。すなわち、晩材部では、形成層齢が増すと、細胞壁率は増大した後、一定になる。他方、早材部では、形成層齢が増すと、

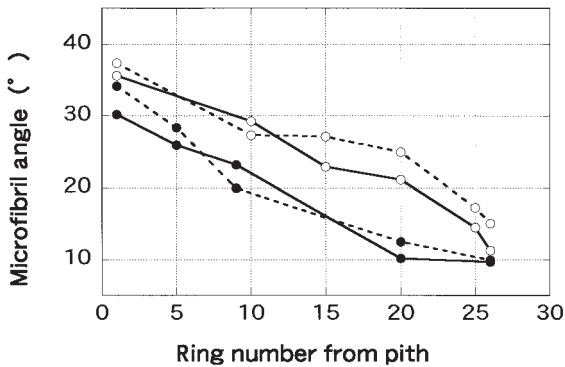


Fig. 10. Variation of microfibril angle with age (ring number from pith) in a slow-grown tree. For legends, see Fig. 4.

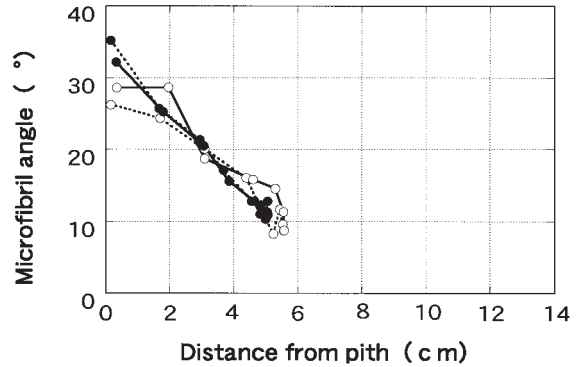


Fig. 12. Variation of microfibril angle with distance from pith in a slow-grown tree. For legends, see Fig. 4.

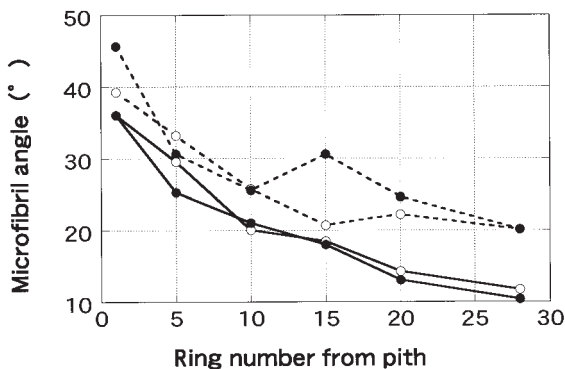


Fig. 11. Variation of microfibril angle with age (ring number from pith) in a fast-grown tree. For legends, see Fig. 4.

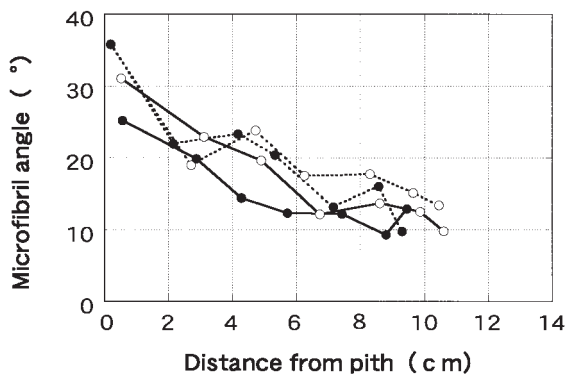


Fig. 13. Variation of microfibril angle with distance from pith in a fast-grown tree. For legends, see Fig. 4.

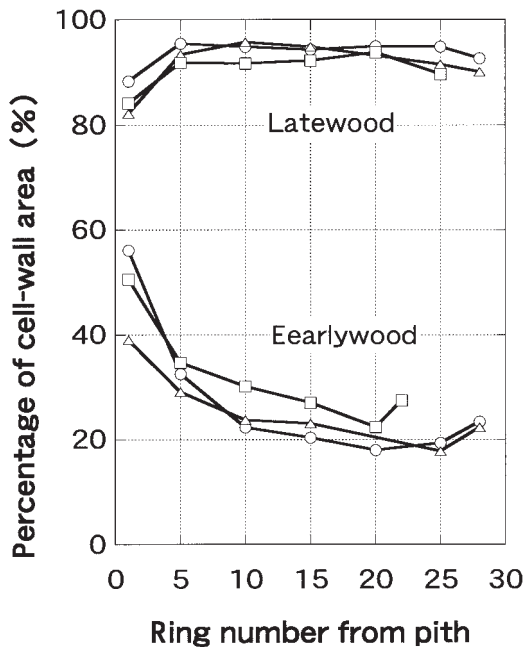


Fig. 14. Variation of the percentage of cell-wall area with age (ring number from pith) in the radial direction in woods from the trees with different growth rates.

○ : a fast-grown tree, △ : a normal-grown tree, □ : a slow-grown tree.

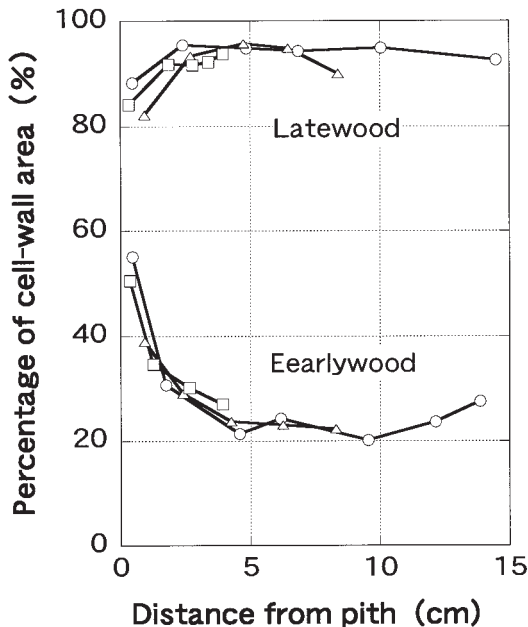


Fig. 15. Variation of the percentage of cell-wall area with distance from pith in woods from the trees with different growth rates. For legends, see Fig. 14.

逆に細胞壁率は減少を示した後、一定になる。さらに、早材部と晩材部の細胞壁率の値の違いが歴然である。木材の材料的性能は、主体的に晩材部細胞壁の量と質、そして形態と配列などに影響を受ける。したがって、ここでは晩材部の細胞壁率の挙動が、極めて重要である。このことは、前述の仮道管の長さや平均マイクロフィブリル傾角の挙動についても言える。

Fig. 15は、細胞壁率と髄からの距離との関係を、肥大成長速さとの関連で、示したものである。成長の速い林木では、成長が標準的な林木や遅い林木に比べて、細胞壁率が一定した成熟材部が多く得られることが明らかである。なお、広葉樹材(たとえばユ-カリ材など)でも、成長が速い林木では、成長の遅い林木に比べて、成熟材部の容積密度数が明らかに大きな値を示すことが報告されている (Wilkes 1984)。

3.2 肥大成長速さと力学および物理的指標

つぎに、林木の肥大成長速さと木材の力学的性能とのかかわりを検討した。まず、最初に縦圧縮ヤング率への形成層齢の影響を、肥大成長速さと関連づけて、Fig. 16に示す。いずれの林木も樹幹内の中心部、すなわち髄を含む試験片では、縦圧縮ヤング率が最小値を示している。形成層齢が大きくなると、縦圧縮ヤング率も増大し、約10年目以上を経過すると未成熟材部から脱却し、成熟材部特有の材料性能を示すようになる。要するに、前述の木材の組織・構造的な材質指標の、未成熟

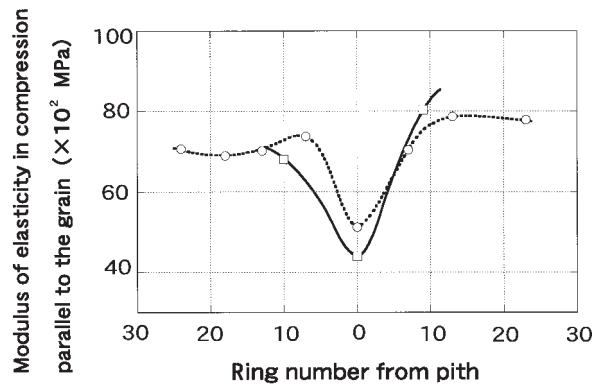


Fig. 16. Radial variation of modulus of elasticity in compression parallel to the grain of woods with age (ring number from pith) in fast- and slow-grown trees.

○ : a fast-grown tree, □ : a slow-grown tree.

材部から成熟材部に至る放射方向の変動パターンに、極めて類似した傾向である。なお、成長の遅い林木では、試験片の製作上、試験片に含まれる年輪数に制約があり、10年輪目付近までの結果が限界であった。

上述のことがらを、肥大成長速さの異なる林木ごとに、髄からの距離（放射方向）との関係で調べた。その結果が、Fig. 17である。成長の速い林木では、安定した縦圧縮ヤング率をもつ成熟材部が多く得られる結果となっている。その一方で、成長の遅い林木では、縦圧縮ヤング率値の変動が大きな未成熟材部が大半である。なお、この研究では縦圧縮強さへの肥大成長速さの影響についても調べたが、前述の縦圧縮ヤング率の挙動と同様の傾向を示した。

この研究では、木材の物理的指標として、とくに木材の3軸方向の収縮率について検討を加えた。肥大成長速さの異なる林木の、樹幹内の髄から木部最外層に至る放射方向の各部位で、木材の繊維(L)、放射(R)、そして接線(T)方向のそれぞれの乾燥にともなう全収縮率をもとめた。その結果、いずれの林木でも形成層齢が増大すると、髄から10~15年付近までは収縮率の変動が大きく不安定な未成熟材部で占められ、その後安定した収縮率値を示す成熟材部がつづいた。また、成長の速い林木では、遅い林木に比べて、成熟材部でR方向とT方向の収縮率がやや小さくなる傾向を示した。しかし、全般的にみると、肥大成長速さの違いが、収縮率に与える影響はあまり明確ではなかった。

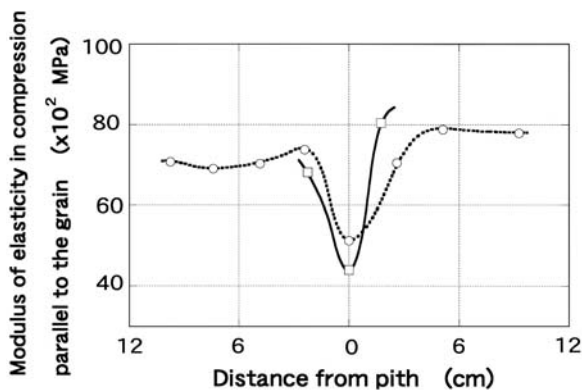


Fig. 17. Radial variation of modulus of elasticity in compression parallel to the grain of woods with distance from pith in fast- and slow-grown trees.

○ : a fast-grown tree, □ : a slow-grown tree.

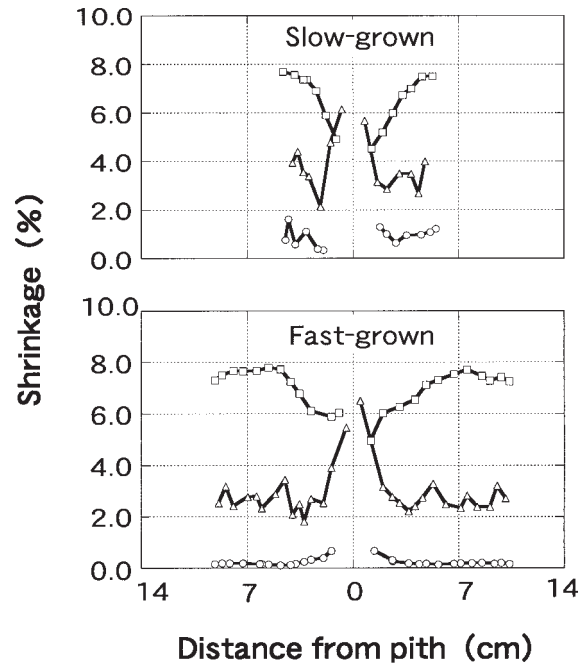


Fig. 18. Radial variation of shrinkage values from green to oven-dry moisture content of woods with distance from pith in fast- and slow-grown trees.

○ : longitudinal direction, △ : radial direction, □ : tangential direction.

さて、つぎに肥大成長速さの異なる林木の3軸方向での全収縮率を、髄からの距離との関係で調べた。その結果、これらの関係は、前述の収縮率と形成層齢との関係に比べて、肥大成長速さの影響が極めて明瞭に表れた。すなわち、成長の遅い林木では、Fig. 18に示すように、収縮率が不安定な未成熟材部の占める割合が大きかった。その一方で、成長の速い林木では、収縮率が安定した成熟材部の占める割合が増加することが、Fig. 18から明らかである。

4. 考察

実験結果ですでに述べたように、肥大成長の速い林木では、成長の遅い林木に比べて、仮道管長さの値が明らかに向上を示した (Fig. 1, 2)。その際、成長速さが増大すると、それらの指標値が無制限に向上を示すのではなく、胸高部直径もしくは成熟材の年輪幅が特定の値に達すると、一定になる傾向が認められた。

さらに、樹幹内の髄から木部最外層に至る放射方向の各部位での組織・構造的指標の変動パタ-

ンを、形成層齢（年輪番号）との関連で調べた。その結果、肥大成長速さが大きな林木の変動パターンと成長速さが小さな林木のそれとの間に、明りょうな違いは認められなかった。

ところが、上述のことがらに関連して、各種の組織・構造的指標値を髄からの距離（放射方向）との関係で調べた結果、各種組織・構造的指標値と形成層齢との関係に比べて、肥大成長速さの影響がより明確に各種指標の変動パターンに現れることが判明した。さらに、肥大成長速さの異なる林木間では、成長速さの遅速にかかわらず、品質の変動が大きく不安定な未成熟材部から、品質が安定した成熟材部に至る各種指標値の変動が、ほぼ同じ経過をたどることがわかった。それゆえ、同一樹齢の林木では、肥大成長速さが大きな場合、安定した品質の成熟材部の材積量増加をより期待できることが明らかになった。林木の肥大成長が速く、材積成長量が大きいことは、木材利用上、好都合である。このことは、スギ人工造林木が、その特徴である『成長の速さ』を武器に、さらにその可能性を広げること結びつくのではなからうか。

このように、前述の髄からの形成層齢（年輪番号）による材質変動は、木材の生物学的な側面からの材質評価を表し、他方で髄からの距離による材質変動（塩倉 1982）は、木材の材料学的なあるいは実用場面での性能評価を表すと推察できた。とりわけ、木材利用の実際場面では、髄からの距離による材質評価法は、極めて有効な手段となるだろう。

さらに、林木の肥大成長速さと関連づけて、未成熟材部から成熟材部に至る放射方向の各部位で、強さやこわさなどの力学的性質を調べた。その結果、それらの変動パターンは、前述の組織・構造的指標の変動パターンと極めてよく対応した。すなわち、力学的指標値と髄からの距離との関係を見ると、成長の速い林木では、安定した強さやこわさをもつ成熟材部が多く得られた。他方、成長の遅い林木では、供試木の樹齢の範囲内において、強さやこわさなどの変動が大きな未成熟材部が大半であった。

また、この研究では、木材の乾燥による狂いに関する基礎的な情報を得るために、木材の3軸方向における収縮率への肥大成長速さの影響につい

ても検討を加えた。その結果、前述の実験結果に示すように、肥大成長速さが大きな林木では、明らかに収縮率の安定した成熟材がより多く得られることが判明した。世界的な森林資源の枯渇から、針葉樹と広葉樹を問わず、樹齢と経級が比較的低い人工造林木からの木材生産が、これからの主流になるだろう（Hillis 1980；Zobel 1981；Bamber *et. al.* 1983；Kennedy 1995）。したがって、そのような原木丸太から製材品を木取ったり、乾燥したりする場面が多くなれば、未成熟材の効果にもとづく障害（そり、ねじれ、割れなど）がますます起こりやすくなる。海外の研究者の中でも、たとえば Perstorperら（1995a, 1995b）や Johansson（2002）は、エンド・ユ・ザとの関連で、乾燥にもとづく木材の狂いの重要性を強調している。つまり、木材の物理的性能評価は、力学的性能評価に比べて、軽視されがちであるが、想像以上に大切なことである。

さて、前述のように、従来、針葉樹では、肥大成長速さが増大すると、年輪幅が広くなり、木材の品質は劣るという考え方が支配的であった（Dinwoodie 1961など）。しかし、今回の研究結果から、木材の組織・構造的な材質指標、そして力学的性能および物理的性能への肥大成長速さの影響を総合的に勘案すると、従来の通念は必ずしも正しくないことがわかってきた。すなわち、肥大成長速さの大きな林木では、安定した高品質の成熟材部の材積量増加をもたらすことが明らかになった。また、内外の研究者たち（Bamber *et. al.* 1983；Zobel *et. al.* 1989；Wilkins *et. al.* 1991a；Wilkins 1991b；Lindstrom 1997；Herman *et. al.* 1998a, 1998b；Chen *et. al.* 1998；北原ら 2000；Donaldson 2008）によっても、上述のこれまでの定説に、疑問が投げかけられてきた。とくに、Zobelら（1989）は、従来、林木の生育過程で、年輪幅が広くて容積密度数が小さな未成熟材部と、本来的に肥大成長が速くて成熟材部の年輪幅が広くなることを、混同して議論が進められてきたことを指摘している。つまり、未成熟材の年輪幅が広いことと、成熟材の年輪幅が広いことは、区別して考えねばならず、同義的に扱えないことが判明した。また彼らは、林木の肥大成長速さが異なる林木において、同一の形成層齢のもとで形成された木部では、必ずしもこの通説が正しくな

いことを強調している。

この研究では、同一スギ林分内での限られた範囲ではあるが、林木の肥大成長速さが木材材質に与える影響を定性的な観点から明らかにしてきた。また、今回は、林木の肥大成長速さの区分を、同一林分内で個体間競争によって生じた結果で行った。しかし、将来的にスギ林業の実践に研究成果を結びつけるためには、保育作業（植栽密度、間伐、枝打ち、肥培など）、スギ品種、環境条件などを考慮に入れて、肥大成長を促進した林木の材質調査が必須となるだろう。加えて、林木の成長と木材材質との関連性を追究する際には、林木の肥大成長のみならず、樹高成長の影響も考慮する必要がある。

要約

この研究では、スギ同一林分内で林木の個体間競争によってもたらされた肥大成長速さの違いが木材材質に与える影響を明らかにした。従来、林木の肥大成長速さが増大すると、年輪幅が広くなり、木材の品質は劣るという考え方が支配的であった。しかし、研究の結果、この通念は必ずしも正しいとは言えないことが明らかになった。すなわち、肥大成長の速い林木では、成長の遅い林木に比べて、その成熟材部の材質に著しい差異は認められず、安定した高品質の成熟材の材積量増加をより期待できることが明らかになった。また、形成層齢にもとづく材質変動に加えて、髄からの距離による材質評価法は、木材利用の実際場面で、極めて有効な手段となるだろう。

キーワード：スギ、肥大成長速さ、放射方向の材質変動、未成熟・成熟材、木材材質

引用文献

- Bamber, R.K. & Burley, J. (1983) The wood properties of Radiata pine. Commonwealth Agricultural Bureaux, England, pp. 1-84.
- Chen, P.Y.S., G. Zhang, J.W. Van Sambeek (1998) Relationships among growth rate, vessel lumen area, and wood permeability for three central hardwood species. *For. Prod. J.* **48**, 87-90.
- Cousins, W. J. (1972) Measurement of mean microfibril angles of wood tracheids. *Wood Sci. Techn.*

6, 58.

- Dinwoodie, J.M. (1961) Tracheid and fibre length in timber. A review of literature. *Forestry*, **34**, 125-144.
- Donaldson, L. (2008) Microfibril angle : measurement, variation and relationships - a review. *IAWA Journal*, **29**, 345-386.
- Herman, M., P. Dutilleul, T. Avella-Shaw (1998a) Growth rate effects on temporal trajectories of ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Wood & Fiber Sci.* **30**, 6-17.
- Herman, M., P. Dutilleul, T. Avella-Shaw (1998b) Growth rate effects on intra-ring and inter-ring trajectories of microfibril angle in Norway spruce (*Picea abies*). *IAWA Journal*, **20**, 3-21.
- Hillis, W.E. (1980) Some basic characteristics affecting wood quality. *Apita*, **33**, 339-344.
- 平川泰彦・藤沢義武 (1995) 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, 123-131.
- Johansson, M. (2002) Prediction of bow and crook in timber studs based on variation in longitudinal shrinkage. *Wood & Fiber Sci.* **35**, 445-455.
- Kennedy, R.W. (1995) Coniferous wood quality in the future : concerns and strategies. *Wood Sci. & Techn.* **29**, 321-338.
- 北原龍士・境田 剛・春山勝昭 (2000) 林木の肥大成長の速さと成長ひずみ。材料, 49, 379-383.
- Lindstrom, H. (1997) Fiber length, tracheid diameter, and latewood percentage in Norway spruce : development from pith outwards. *Wood & Fiber Sci.* **29**, 21-34.
- Perstorper, M., P.J.Pellicane, I.R.Kliger, G.Johansson (1995a) Quality of timber products from Norway spruce. Part 1. Optimization, key variables and experimental study. *Wood Sci. Techn.* **29**, 157-170.
- Perstorper, M., P.J.Pellicane, I.R.Kliger, G.Johansson (1995b) Quality of timber products from Norway spruce. Part 2. Influence of spatial position and growth characteristics on warp. *Wood Sci. Techn.* **29**, 339-352.
- 佐伯 浩 (1962) 針葉樹材年輪内における細胞膜量及び比重の推定。木材学会誌, 8, 19-25.
- 塩倉高義 (1982) 針葉樹幹材における未成熟材の区分とその範囲。木材学会誌 28, 85-90.
- 渡辺治人 (1978) 木材理学総論。農林出版。東京。

pp. 24-25.

- Wilkes, J. (1984) The influence of rate of growth on the density and heartwood extractives content of eucalypt species. *Wood Sci. Techn.* **18**, 113-120.
- Wilkins, A.P. & R. Kitahara (1991a) Silvicultural treatment and associated growth rates, growth strains and wood properties in 12.5-year-old *Eucalyptus grandis*. *Aust. For.* **54**, 99-104.
- Wilkins, A.P. (1991b) Effect of silvicultural treatment on the growth and wood properties of *Eucalyptus grandis*. PhD Thesis, Macquarie Univ., Sydney, Australia. pp. 1-255.
- Zobel, B.J. (1981) Wood quality from fast-grown plantations. *Tappi*, **64**, 71-74.
- Zobel, B.J. and van Buijtenen J.P. (1989) Wood Variation. Its Causes and Control. Springer-Verlag, Berlin, pp. 1-363.