

<論文>

ケヤキ樹幹内の材質変動特性  
一年輪幅, 繊維長, 道管要素長, 気乾比重, 縦圧縮強度の水平変動一

古川 郁夫\*・福谷 繁樹\*\*・岸本 潤\*

Characteristics of the Variation of Wood Quality within Keyaki (*Zelkova serrata* MAKINO) Trees  
Horizontal variations of ring width, fiber length, vessel element length,  
Specific gravity and longitudinal compression strength

IKUO FURUKAWA\*, SHIGEKI FUKUTANI\*\* and JUN KISHIMOTO\*

Summary

The purpose of this study is to clarify the characteristics of the variation of wood-quality within the trunks of Keyaki (*Zelkova serrata* Makino) trees, which is the most valuable hard-wood species in Japan. Another aim was to obtain basic information about wood-quality control in a man-made Keyaki forest.

Five Keyaki trees, which had been grown in Nichihara, Shimane prefecture, were examined. Two of them were naturally-grown trees, which were 148 and 210 years old, and the other three were planted trees. Their ages were fifty to sixty years old, and they were left untouched after planting.

The horizontal variation of wood qualities within the trunks was evaluated and determined for the following indices: average annual ring width (RW), fiber length (FL), vessel element length (VEL), specific gravity (SG) and longitudinal compression strength (LCS). These indices were plotted with the ring number from pith (RN) as abscissa.

The RW showed a maximum between 20th and 30th in RN, and after that drastically decreased. The VEL was always constant. The FL, however, showed a saturation curve, that is, it increased during the first sixty years from the pith, then leveled off. The SG also showed a maximum between 25th and 30th in RN, then gradually decreased. The LCS showed a pattern very similar to the SG. There was a good correlation between them ( $r=0.84-0.90$ ). Also, there was a fairly good correlation between LCS and RW ( $r=0.64-0.73$ ). Based on these evidences, it will be possible to control the wood-quality of

\* 鳥取大学農学部農林総合科学科生存環境科学講座 : *Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture, Tottori University.*

\*\* 越井木材(株) : *Koshii Mokuzai Ltd. Co., Osaka, Japan*

the planted Keyaki trees by adjusting their diameter increment by means of tending works such as fertilization, improvement cutting, thinning operation, and so forth. Furthermore, it was very interesting to note that Keyaki has no distinct juvenile-wood portion, because the horizontal variation of the wood-quality-indices except FL showed similar tendency before reaching the constant length of FL and after its saturation.

## I 緒 言

ケヤキ (*Zelkova serrata* Makino) は、日本の暖帯地域に自生する落葉喬木であり、日本産喬木中最高、最大木の一つである。ケヤキの雄大で端正な樹形、旺盛な生長力と強健な樹性は環境緑化樹として適しているだけでなく、その材は重硬で美しく、独特の木目と美しい柵をもち、しかも耐朽性が高く、加工性に優れていることから、材質的にも最高である。このように、ケヤキは極めて有用な広葉樹でありながら、用材生産を目的とした人工造林はほとんどなく、現在でも需要の大半を天然更新に依存している。そのため、ケヤキの材質特性については、他の広葉樹と同様に詳しい情報のないまま今日に至っている。

そこで、本研究では、今後ケヤキの人工造林を行なう際に必要と思われる材質管理に関する基礎的知見を得ることを目的として、人工植栽木と天然木のケヤキの樹幹内部における材質の変動特性を調べ、ケヤキに固有の材質特性が存在するのかどうか、また、得られた材質特性を基にしてケヤキ造林木の材質管理が可能かどうかという点について検討した。

## II 材 料 と 方 法

供試材料のケヤキは、大阪営林局日原営林署(島根県)管内の猪木谷第28林班、標高約700m、B<sub>0</sub>型土壌、南向斜面のクリ・コナラ混交林に交じって自生していた樹齢210年生(D.B.H. 80.5cm)および148年生(D.B.H. 39.0cm)の天然木2本、ならびに同営林署高嶺芦谷第15林班、標高約750m、B<sub>0</sub>型土壌、南西斜面の落葉広葉樹混交林を一部開墾して、そこに人工植栽した樹齢約60年生のもの2本(D.B.H. 25.5cmと25.0cm)と約50年生のもの1本(D.B.H. 23.5cm)を用いた。但し、これらの植栽木は、植栽後保育施業を全く施していないため、生育のごく初期を除いて、生育環境条件は天然木のそれとほぼ同じであったと考えていいであろう。

材質試験は、年輪幅、繊維長、道管要素長、気乾比重、縦圧縮強度の5項目について行い、これらの髄からの年輪数に対する変動(水平変動)を調べた。

髄からの年輪数は、肉眼またはルーペを用いて数えた。年輪が密に詰まっているぬか目材の部分は双眼実体顕微鏡で拡大して数えた。

平均年輪幅は、各供試木の木口円板上で最大半径方向と最小半径方向の2方向に沿って各年輪に対して垂直になるよう基準線を設け、基準線に沿って髄から3年輪分毎の平均年輪幅を求めた。

繊維長と道管要素長は以下のようにして求めた。各円板から上記の2方向に沿ったブロック(円板の半径長さ(R)×約2(T)cm×約3(L)cm)を作製し、このブロックの髄から60年までは3年輪毎に、それより外側では10年輪毎に、マッチ軸木大で長さ1cm位の小片を採取した。これらの小片を3倍に

希釈したJeffrey氏液中に一昼夜浸漬後、水洗し、解繊した。解繊懸濁液を一時プレパラートにした後、万能投影器で50倍に拡大して、スクリーン上で木繊維と道管要素 (tail-to-tail) の長さを測定した。所定の1年輪部につき木繊維は1半径方向で50本、道管要素は30本測定し、これらの平均値を求め、それぞれ繊維長、道管要素長とした。測定総本数は17,360本であった。

気乾比重と縦圧縮強度は次のようにして求めた。繊維長測定用小片の採取部位にできるだけ近いところから直方体の小試験片 (1 (R)cm×1 (T)cm×2 (L)cm) を作製し、これを気乾状態にした後、常法に従って気乾比重を求めた。つづいてこれらの小試験片の縦圧縮強度を求めた。試験には島津オートグラフAG-5000Aを用い、その時のテストスピードは3 mm/minとした。試験は全部で258個の試験片について行った。

なお、210年生天然木の髄から150年より外側および148年生天然木の髄より70年から125年の間の部分は極端なぬか目材となっていたため、所定年輪部位からの解繊用小片および比重・強度測定用試片の採取が困難であり、一部の項目の材質試験しか実施できなかった。

### III 結果と考察

#### 1. 平均年輪幅の水平変動

年輪幅は、樹幹の肥大生長 (直径生長) の変動を把握する上で重要な材質指標である。

植栽木の平均年輪幅の水平変動を図1に示した。いずれの供試木も髄から20年位のところで最大の肥大生長 (4.2~4.5mm/年) を示した。その後、肥大生長は急激に減少した。天然木の平均年輪幅の水平変動を図2に示した。148年生木は植栽木の変動パターンと似ており、髄から30年位で肥大生長が最大 (2.8mm/年) を示し、その後は0.5~1.3mm/年の間を変動した。210年生木は、局所的な生育環境もしくは個体の遺伝的性質の違いに依るのかどうかその原因は不明であるが、他の供試木の生長変

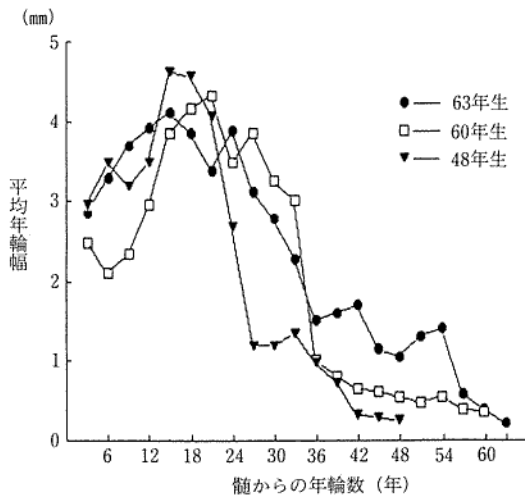


図1 植栽木の平均年輪幅の水平変動

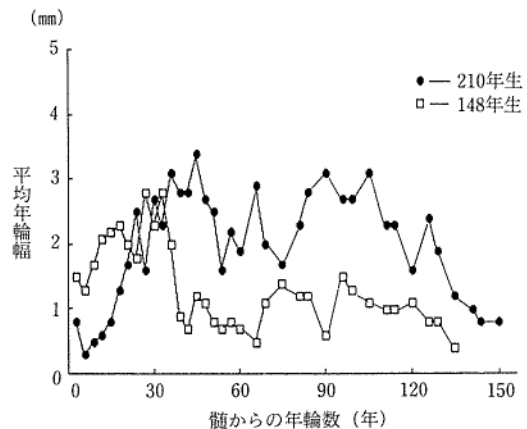


図2 天然木の平均年輪幅の水平変動

動パターンと異っていた。すなわち、髄から25年位までの初期生長が悪く、それに続く約100年間はかなり旺盛な肥大生長(1.6~3.4mm/年)を維持していた。このことは、ケヤキの場合、樹齢100年以上の老齢木であっても、生育環境条件が良ければ、かなり良好な直径生長が期待できることを示唆するものである。

2. 繊維長および道管要素長の水平変動

主要構成要素の長さは、材質変動を把握する上で最もよく利用される材質指標である。とくに、針葉樹の幹材質を評価する際には、仮道管長がその指標として用いられ、その変動パターンはサニオの法則としてよく知られている。広葉樹の繊維長の水平変動にもサニオの法則が現象的にはよく当てはまることが報告されている<sup>1-4)</sup>。しかしながら、広葉樹の場合には、道管要素長の水平変動が繊維長の水平変動と一致する場合としない場合とがあり<sup>5,6)</sup>、ケヤキは後者を代表する樹種である。すなわち、古川らによる広葉樹の繊維長・道管要素水平変動パターンの分類基準<sup>5)</sup>によれば、針葉樹や比較的進化程度の低い広葉樹は分類のIII型に属するのに対し、ケヤキのように進化が進んだ高等な広葉樹は分類のI型に属する。

図3には植栽木3本の、図4には天然木2本の繊維長と道管要素長の水平変動を示した。ケヤキは、天然木、植栽木ともに、髄から約

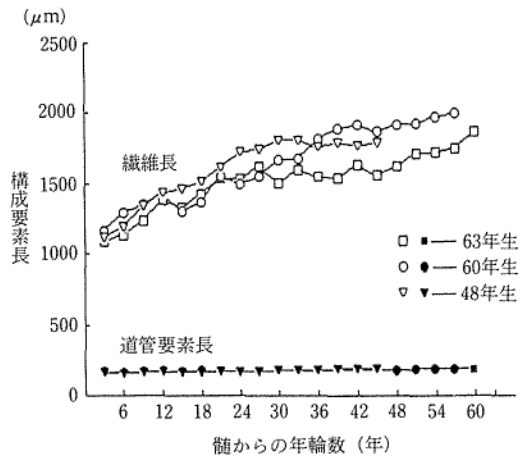


図3 植栽木の繊維長、道管要素長の水平変動

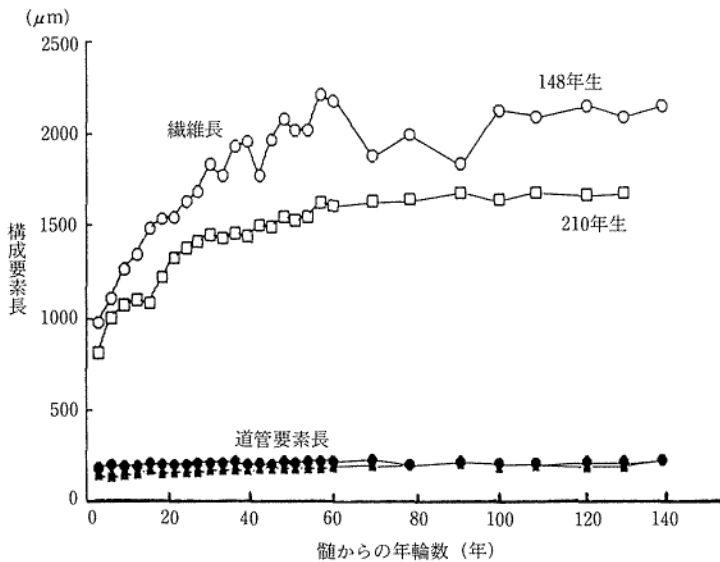


図4 天然木の繊維長、道管要素長の水平変動

60年未満では、繊維長が髄からの年輪数の増加とともに800ないし1000 $\mu\text{m}$ から1600ないし2000 $\mu\text{m}$ へと飽和曲線的に増加した。この間、道管要素長は170 $\mu\text{m}$ から200 $\mu\text{m}$ へと微増しただけであった。髄から60年輪より外側では、繊維長の変動は少なく、1700 $\mu\text{m}$ から2200 $\mu\text{m}$ の範囲でほぼ一定であった。また、この間道管要素長は約200 $\mu\text{m}$ で変動が全くなく、一定であった。

このように、ケヤキの繊維長と道管要素長の変動パターンは、先に示した年輪幅の変動とは無関係に規則的な変動パターンを示した。このことは、ケヤキの繊維長や道管要素には生育環境の影響が少なく、むしろ樹種に固有の遺伝的な性質が強く影響しているのであろう。

### 3. 気乾比重および縦圧縮強度の水平変動

植栽木および天然木の気乾比重の水平変動を図5, 6, 7に示した。図5は、植栽木3本全部の、また図6と7には148年生天然木と210年生天然木の髄から130年までの気乾比重の測定結果を髄からの年輪数に対してプロットしたものである。全供試木において、気乾比重は髄から25~30年のところで

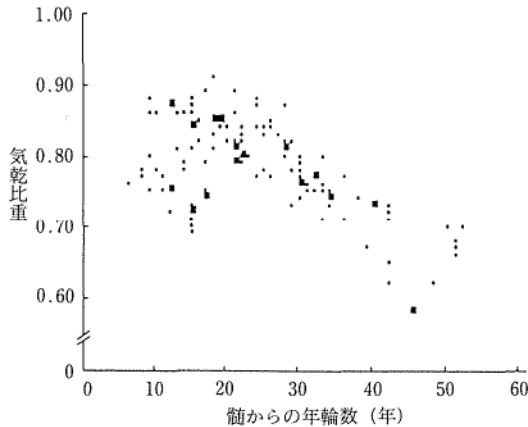


図5 植栽木の気乾比重の水平変動

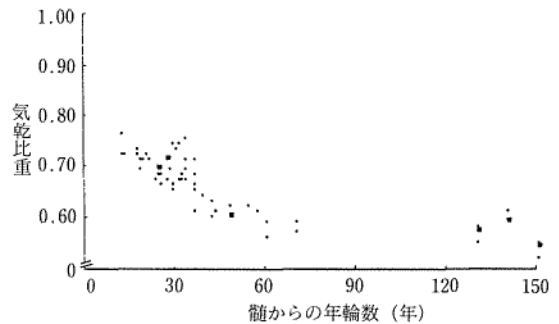


図6 148年生天然木の気乾比重の水平変動

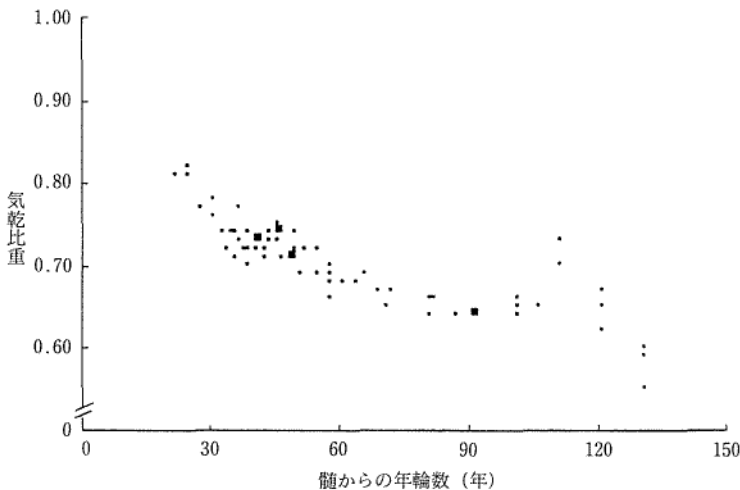


図7 210年生天然木の気乾比重の水平変動

最大値を示し、それより外側では樹皮側に向って比較的単調に減少する傾向が認められた。気乾比重のこのような変動パターンは、平均年輪幅の変動パターンとよく似た傾向を示すもの(植栽木や148年生天然木)とそうでないもの(210年生天然木)とがあった。いずれにしても、気乾比重の水平変動は比較的単調であり、その変動傾向はクヌギとも似ていた<sup>7)</sup>。さらに、スギの容積密度の変動パターン<sup>8)</sup>とも類似していたのは興味深い。

次に、植栽木および天然木の縦圧縮強度の水平変動を図8、9、10に示した。図8は植栽木3本の、図9と10は148年生天然木と210年生天然木の縦圧縮強度を髄からの年輪数に対してプロットしたものである。縦圧縮強度の変動は比重の変動とよく似ていた。すなわち、縦圧縮強度は、210年生天然木を除いて、髄から20~30年で最大(約700kg/cm<sup>2</sup>)を示し、それより外側では樹皮側に向って減少する傾向が認められた。210年生天然木では、髄から70年位まで高い強度を維持し続け、それ以降髄からの年輪数とともに減少し、髄から130年付近のぬか目材のところで強度は急激に低下した。

このように、ケヤキの場合、気乾比重や縦圧縮強度は繊維長や道管要素長の水平変動パターンと傾向が全く異っていたことから、クヌギの構成要素長と縦圧縮強度との間におい

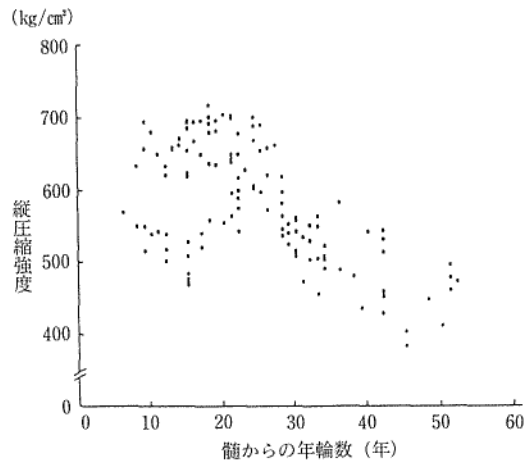


図8 植栽木の縦圧縮強度の水平変動

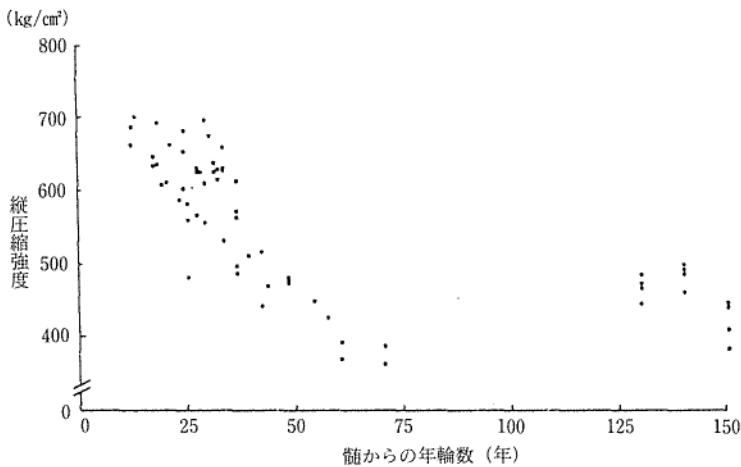


図9 148年生天然木の縦圧縮強度の水平変動

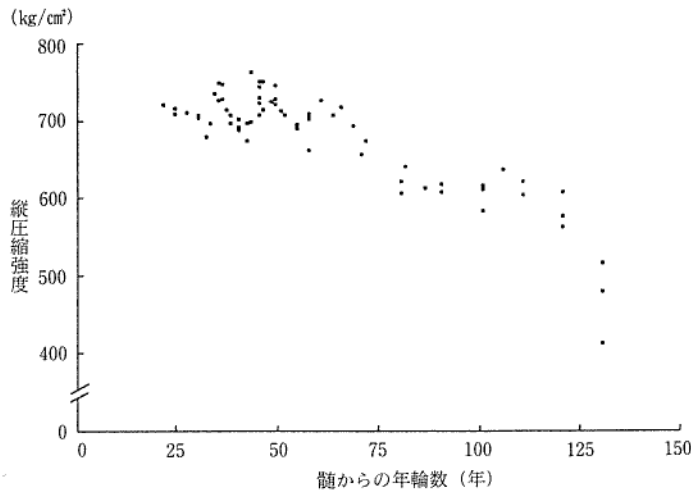


図10 210年生天然木の縦圧縮強度の水平変動

てみられたような関連性<sup>7)</sup>は存在しないであろう。

#### 4. 未成熟材と成熟材の材質区分

一般に樹幹内部の材質は、樹心付近の材質的に不安定な未成熟材部とこれの外側に形成される材質の安定した成熟材部とに区分される。ところが、これらの材質を明瞭に区分する方法は、現在でも確立されていない。最も代表的な材質区分法は、形成層始原細胞の成熟度、すなわち始原細胞の長さを指標として、これが安定する（一定に達する）時点でもって材質の区分点とする考え方である。この考え方に従って、始原細胞の長さを始原細胞から分裂・分化してできた仮道管や木繊維の長さから推定することがよく行なわれてきた<sup>2,3)</sup>。すなわち、繊維長の水平変動パターンから材質の区分点を判定しようとする方法である。この方法は、始原細胞から分裂した後の分化過程で伸長生長量の少ない仮道管から構成されている針葉樹や比較的進化程度の低い広葉樹においては有効であろう<sup>2,8)</sup>。

しかしながら、ケヤキ<sup>9)</sup>やニセアカシア<sup>10)</sup>等の進化程度の高い広葉樹では、始原細胞の長さを反映する道管要素長が水平方向でほとんど変化せず一定であるのに対して、繊維長は針葉樹仮道管と同じ様に明瞭な飽和曲線を示す。そこで、仮に繊維長の飽和点を材質区分点と考えた場合、ケヤキでは髄から約60年までが未成熟材ということになる。そこで、髄から60年未満の材部(植栽木、天然木の両者)と60年以降の材部(天然木のみ)に分けて材質試験の結果を整理したものが表1である。

天然木において髄から60年未満の材と60年以降の材の材質は、繊維長に明瞭な違いがあることを除けば、縦圧縮強度、平均年輪幅の変動幅や変動傾向はほぼ同じであり、縦圧縮強度はむしろ平均年輪幅や気乾比重の大きかった60年未満の材部が高い値を示した。また、縦圧縮強度と平均年輪幅、縦圧縮強度と気乾比重との間の相関関係においてもほぼ同様の傾向が認められた。さらに、植栽木と天然木の60年未満の材部を比較した場合、植栽木の肥大生長はやや大きく、強度がやや低かったが、材質的にはむしろ天然木の60年以降の材部の性質と似ていた。このようにケヤキの材質の特徴は、道管要

表1 ケヤキ植栽木および天然木の材質特性の比較

	植 栽 木	天 然 木	
		髓から60年未満の材	60年以降の材
繊維長 ( $\mu\text{m}$ ) (最小-最大)	1098-2004	819-2076	1607-2210
道管要素長 ( $\mu\text{m}$ ) (最小-最大)	168- 201	149- 201	197- 239
平均年輪幅 (mm) (最小-平均-最大)	0.23-2.05-4.21	0.70-1.75-3.40	0.80-1.54-3.10
気乾比重 (最小-平均-最大)	0.58-0.79-0.91	0.56-0.70-0.82	0.52-0.62-0.73
縦圧縮強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) (最小-平均-最大)	382-586-716	367-640-759	361-543-713
強度(Y)と年輪幅( $X_1$ )の 関係	$Y = 46.5X_1 + 425.8$ $r = 0.64$	$Y = 99.3X_1 + 412.4$ $r = 0.76$	$Y = 93.6X_1 + 377.6$ $r = 0.73$
強度(Y)と比重( $X_2$ )の 関係	$Y = 1052.5X_2 - 248.5$ $r = 0.84$	$Y = 1479.5X_2 - 397.2$ $r = 0.87$	$Y = 1773.9X_2 - 530.4$ $r = 0.90$

素長の水平変動パターンが示唆しているように、樹心から樹皮側に向って肥大生長にかなりの変動が存在していても、材質的には安定した材が長期にわたって形成され続けることである。したがって、ケヤキでは樹幹内部に材質の極端に劣る未成熟材のような材部は存在せず、すべてが成熟材と考えることもできる。このことは、ケヤキの場合、イシゲヤキのような特殊な材質<sup>9)</sup>を形成しない限り、小径木であっても大径木であっても、また幼齢木でも老齢木でも材質的な違いは少なく、むしろ小径木であっても大径木と同様の材質的特性を有していることに注目すべきであろう。

したがって、広葉樹の材質区分は繊維長の変動パターンを基準にするのではなく、道管要素の変動パターンでもって判定することが重要である。

## 5. 材質管理の可能性

林木を人工造林で育てる場合、造林木の材質を保育施業でもってある程度コントロールすることを、ここでは材質管理 (wood quality control) という言葉で表わすとし、ケヤキ造林木の材質管理について次のように考えた。

ケヤキの材質特性のうち、道管要素長は樹齢や生育環境に関係なく一定であることから、これの長さを変えることはできない。また、繊維長も生育環境に影響されることなく髓からの年輪数 (形成層の加齢) に一義的に依存しているため、保育施業によって変えるのは困難であろう。これに対して、比重 (容積密度) や強度は、ある程度人為的に管理することができると考えられる。何故ならば、表1にも示されているように、気乾比重と縦圧縮強度、さらに縦圧縮強度と平均年輪幅の間にはかなり強い正の相関関係 ( $r = 0.64 \sim 0.90$ ) が存在するからである。すなわち、強度は比重に強く依存し ( $r = 0.84 \sim 0.90$ )、しかも強度は年輪幅にも相当依存している ( $r = 0.64 \sim 0.73$ ) ため、年輪幅、すなわち



直径生長量を人為的に変化させることによって強度や比重をある程度変えることができると考えられる。ちなみに、日本木材加工技術協会編の日本産主要木材に掲載されているケヤキの平均縦圧縮強度値<sup>9)</sup>(500kg/cm<sup>2</sup>)以上の強度をもつ造林木を生産しようとするれば、樹幹の年間直径増加量を少なくとも1.8mm以上に、また3.2mm以上だとほぼ確実に平均強度を上回る材を生産することができると推定される。また、このときの材の気乾比重は0.6~0.7であろう。したがって、これよりさらに重硬で強い材が必要であれば、さらに生長を促進するような施業、例えば施肥とか除間伐を施せばよい。また逆に、これより軽く、強度も低い材を望むならば、生長を強く抑制するような施業、例えば密植に仕立てるとか被圧してぬか目材を生産するようにすればよい。

このように、ケヤキの場合は、樹齢や材形成年齢に関係なく、強度や比重などの物理的材質特性をある程度保育技術によって管理することができるであろう。

#### IV 結 論

ケヤキ植栽木(樹齢48年から63年)3本と天然木(樹齢148年と210年)2本について、その平均年輪幅、繊維長、道管要素長、気乾比重、縦圧縮強度の半径方向の変動(水平変動)を調べた結果、以下の結論が得られた。

1. 平均年輪幅は、髓から20~30年で最大値を示し、その後急激に減少した。
2. 道管要素長は樹齢や年輪幅に関係なくその長さが一定(約200 $\mu$ m)であったのに対して、繊維長は髓からの年輪数とともに800 $\mu$ mから2000 $\mu$ mへと飽和曲線的に増加し、髓から60年位でその長さが安定した。
3. 気乾比重は髓から25~30年で最大(0.75~0.85)となり、その後樹皮側に向って漸減した。
4. 縦圧縮強度は気乾比重に強く依存して変動し、両者の間には強い正の相関( $r=0.84\sim0.90$ )が認められ、同時に年輪幅との間にも正の相関( $r=0.64\sim0.73$ )が認められた。
5. 樹幹内部の材質は、植栽木も天然木も、また髓より60年未満の材部も60年以降の材部も変動特性が類似しており、樹幹全体が成熟材的であった。
6. 広葉樹においても、保育施業によって、樹幹の肥大生長を調節できれば、ある程度樹幹の材質を管理することが可能であろう。

#### 謝 辞

本研究を実施するにあたり、大阪営林局日原営林署より材料を提供していただいた。また、鳥取大学農学部橋詰隼人教授には試料木の選定ならびにとりまとめに際して種々有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

#### 文 献

- 1) 田島俊雄：林木の生長と材質の変動，木材誌，17(10)，423~430(1971)
- 2) 渡辺治人，松本 昂，林 弘也：未成熟材に関する研究(第3報)広葉樹材についての実験，木材誌，12(6)，259~265(1966)

- 3) 須川豊伸：主要広葉樹の繊維長，林試研報，**306**，135～167（1979）
- 4) 古川郁夫ほか：小径広葉樹の材質（第1報）コナラ・クヌギの繊維長の樹体内変動，木材誌，**27**（6），507～511（1981）
- 5) 古川郁夫ほか：小径広葉樹の材質（第2報）小径広葉樹71種の繊維長および道管要素長の水平変動，広葉樹研究，**2**，103～134（1983）
- 6) 古川郁夫ほか：小径広葉樹の材質（第3報）層階状もしくは非層階状構造をもつ樹種の繊維長および道管要素長の水平変動，鳥取大農研報，**35**，42～49（1983）
- 7) 古川郁夫，橋詰隼人：クヌギ壮齢木の材質に及ぼす施肥および整理伐の影響，木材誌，**33**（6），443～449（1987）
- 8) 深沢和三：スギ樹幹内の材質変動に関する研究，岐阜大農研報，**25**，47～128（1967）
- 9) 橋詰隼人ほか：ケヤキの利用材積と材質について，広葉樹研究，**4**，49～59（1987）