

クリにおける木部繊維長および孔圏道管内腔径の水平変動と 肥大成長段階との関連性*1

土屋竜太*2, 古川郁夫*3

The Relationship between Radial Variation of Wood Fiber Length, Vessel Lumen Diameter and the Stage of Diameter Growth in *Castanea crenata**1

Ryouta TSUCHIYA*2 and Ikuo FURUKAWA*3

In order to clarify the relations among the radial variation of wood fiber length, earlywood vessel lumen diameter and the process of diameter growth, the authors studied wood fiber length, earlywood vessel lumen diameter, and cumulative annual ring width for each ring number from the pith, using a total of 16 disks obtained from 4 parts at different stem heights from 4 individuals of *Castanea crenata*. The process of diameter growth was classified into the three stages: young stage, middle stage, and old stage, by applying the Gompertz growth function to the radial variation in cumulative annual ring width. The maturation ages of wood fiber length and earlywood vessel lumen diameter were estimated with the segmented nonlinear regression analysis method. As a result, it was found that the maturation age of wood fiber length is younger than that of earlywood vessel lumen diameter, and is near the age at the boundary between the young and middle stages of diameter growth in most cases. The maturation age of earlywood vessel lumen diameter is near the age at the boundary between the middle and old stage in many cases. These results indicate that there is some relation between the radial variation in wood fiber length and earlywood vessel lumen diameter and the process of diameter growth.

Keywords: diameter growth, radial variation, fiber length, vessel diameter, maturation age.

肥大成長段階と木部繊維長および孔圏道管内腔径の水平変動との関連性を調べるために、クリ (*Castanea crenata*) 4 個体の地上高別 4 箇所、合計16枚の円板を用いて、髄からの年輪番号に伴う木部繊維長、孔圏道管内腔径、累積年輪幅の変動を調べた。肥大成長段階は累積年輪幅の変動にゴンペルツ成長関数式をあてはめることで幼齢期、壮齢期、老齢期の3段階に分類した。非線形区分回帰分析法によって木部繊維長と孔圏道管内腔径の成熟齢を求めた結果、木部繊維長の成熟齢は孔圏道管内腔径よりも若く、肥大成長の幼齢期と壮齢期の境界齢に近似したのに対して孔圏道管内腔径の成熟齢は壮齢期と老齢期の境界齢に近似する傾向が認められた。これらの結果から、木部繊維長と孔圏道管内腔径の水平変動は肥大成長段階と関連することが示唆された。

1. 緒 言

未成熟材は形成層の未熟な段階に形成される材部

であり、成熟材に比べて材質が劣る¹⁾ことから木材中での未成熟材の範囲を知ることは木材の有効利用の観点から重要である。未成熟材は針葉樹と広葉樹の両方に存在する²⁾にも関わらず、その研究は主として針葉樹において進められてきた。針葉樹では未成熟材の範囲を推定するための指標(材質指標)として仮道管長が用いられる。すなわち、仮道管長が髄からの年輪番号の増大に伴って急激に増大する部位を未成熟材部、変動の少ない部位を成熟材部とする方法である^{3,4)}。この方法によって求められた仮

*1 Received May 7, 2007; accepted November 21, 2007.

*2 鳥取大学大学院連合農学研究科 The United Graduate School of Agriculture Sciences, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan

*3 鳥取大学農学部 Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan

道管長の安定する髓からの年輪番号（成熟齢）は地上高や初期の肥大成長の良否によって異なる可能性があり、針葉樹では肥大成長の制御が樹木の保育を行う上で重要であることが指摘されている⁵⁾。

一方、広葉樹ではほとんどの樹種において木部繊維長と道管内腔径が仮道管長と同様の飽和曲線の変動傾向を示し⁶⁾、これらを材質指標として成熟齢の決定に利用した研究が多数報告されている⁶⁻¹⁴⁾。従って、木部繊維長と道管内腔径は広葉樹における有力な材質指標と考えられるが、それらの成熟齢と地上高あるいは肥大成長の良否との関連性については研究が少なく明らかでない。

ところで、樹幹の肥大成長は縦軸に成長量、横軸に時間をとった場合に、シグモイド型の成長曲線式を示すことが知られている^{15,16)}。その肥大成長曲線式に基づき、肥大成長は幼齢期（連年成長速度が最大に達するまでの成長期間）、壮齢期（連年成長速度が最大に達してから平均成長速度が最大に達するまでの成長期間）、老齢期（平均成長速度が最大に達してから成長が停止するまでの成長期間）の3段階に区分される¹⁶⁾。このような成長段階の把握は効率的に材積を収穫するための伐期決定の際に用いられるが、木材の有効利用の観点からは材質指標の成熟化との関連性を調べるのが重要であると思われる。さらに、成長段階を区分することで、「初期の肥大成長」といった表現を明瞭にでき、材質指標の変動との関連性についても議論しやすい。しかしながら、広葉樹において両者の関連性は調べられていない。

そこで本研究では、我が国に広く植栽あるいは自生しその材が幅広い用途に用いられるクリ (*Castanea crenata*) を用い、広葉樹での有力な材質指標である木部繊維長と孔圏道管内腔径の水平変動を肥大成長段階ごとに比較し、両者の関連性を検討する。

2. 実験方法

2.1 試料

鳥取大学農学部附属教育研究林蒜山の森に自生していたクリ4個体を用いた。供試木の選定にあたって、樹幹が通直で目立った外傷の認められない個体を選び、樹幹南側に印を付けて根元地際部で伐倒し、根元から1.3, 3.8, 6.3, 8.8 mの部位から厚さ5 cm程度の円板を採取し、各円板の南側から接線方向に1 cm程度の髓を含む半径ストリップを切り出した。試料の概要をTable 1に示す。

2.2 木部繊維長、孔圏道管内腔径、年輪幅の測定

ストリップを半径方向に連続した幾つかの小ブロックに分割した後、それぞれの小ブロックからマイクロトームを用いて厚さ20 μ mの横断面切片を切り出し、切片をエタノールシリーズで脱水処理後キシレンに置換し、ビオライトに封入して永久プレパラートを作製し、年輪幅と孔圏道管内腔径の測定に用いた。

年輪幅を測定するために、永久プレパラートを万能投影器のスクリーン上に20倍に拡大投影し、放射組織に沿うようにして各年輪4箇所における幅を計測、それらの平均値を各年輪の年輪幅とした。

Table 1. Summary of the samples.

Tree No.	Sample No.	Sampling heights (above ground)	Number of rings	Mean ring width (mm)	Radius (mm)	Excentricity ratio (S/O) ^{a)}
A	A-1	1.3 m	42	2.1	107	1.14
	A-2	3.8 m	40	2.1	96	1.14
	A-3	6.3 m	35	1.8	78	1.18
	A-4	8.8 m	25	1.6	48	1.17
B	B-1	1.3 m	44	2.4	122	1.20
	B-2	3.8 m	34	1.6	65	0.55
	B-3	6.3 m	32	2.5	91	1.08
	B-4	8.8 m	26	1.9	61	1.33
C	C-1	1.3 m	43	2.6	122	1.18
	C-2	3.8 m	37	2.1	93	1.02
	C-3	6.3 m	30	1.9	65	0.87
	C-4	8.8 m	23	1.6	49	1.20
D	D-1	1.3 m	34	2.8	102	0.80
	D-2	3.8 m	33	2.5	90	1.01
	D-3	6.3 m	30	2.3	75	0.99
	D-4	8.8 m	23	1.7	45	0.98

a) : Sample side radius divided by opposite side radius.

孔圏の道管内腔径を測定するために、年輪界に接する道管を孔圏道管とし、光学顕微鏡の対物レンズの倍率を4倍(総合倍率40倍)に設定し、デジタルカメラ(オリンパス社製CAMEDIA C-5050ZOOM)を用い、第2年輪から始めて各年輪の年輪界から第1列目の孔圏道管を1024×768 pixelの画像として撮影し、撮影した画像をメモリーカードに保存した後、画像を画像解析ソフト(三谷商事製Win Roof version 5.0)を用いて孔圏道管内腔の円相当径を各年輪10個以上計測し、平均値を孔圏道管内腔径とした。

木部繊維長を測定するために、カミソリを用いて各年輪中央部から厚さ0.5 mm程度の薄片を切削し、薄片をシュルツ氏液で解繊した後、一時プレパラートとし、万能投影器のスクリーン上に100倍で拡大投影し、各年輪50本の木部繊維の先端から先端の長さを計測し、平均値を木部繊維長とした。

2.3 成熟齢の推定

本研究では木部繊維長や道管内腔径の成熟化の指標として非線形区分回帰分析法⁸⁾によって算出される成熟齢を用いた。すなわち、髄からの年輪番号を説明変数、木部繊維長あるいは道管内腔径を目的変数とし、目的変数が髄から外側に向かって急激に増大する部分を二次関数で、一定に達した部分を定数として、二次関数と定数を連続的に接続した関数をあてはめ、あてはめた関数からの残差が最小になるときの二次関数と定数関数との接続部の髄からの年輪番号(すなわち二次関数の極大点での説明変数の値)を木部繊維長(あるいは孔圏道管内腔径)の成熟齢とした。なお、この解析にはSPSS Regression Model 12.0の非線形回帰分析法を用いた。

2.4 肥大成長曲線式のあてはめ

様々なシグモイド成長曲線式のうち、ゴンペルツ成長曲線式は林木の成長モデルとして理論的な整合性をもつ曲線式である¹⁵⁾ことから、本研究での肥大成長曲線式として用いた。ゴンペルツ成長曲線式は次式で表される¹⁷⁾。

$$y = A \exp(-e^{a-bt}) \quad (1)$$

y : 累積年輪幅 [mm], t : 髄からの年輪番号, A : 上限値, a, b : パラメータ。

なお、ゴンペルツ成長曲線式のあてはめにはSPSS Regression Model 12.0の非線形回帰分析法を用いた。

連年成長曲線式は式(1)の一次導関数式(式2)であり、連年成長速度最大時の髄からの年輪番号(幼齢期と壮齢期の境界齢, t_1)は式(2)の一次導関数式が0になる時の t の値であり、 $t_1 = a/b$ によって求め

た。

$$y' = Ab \exp(-e^{a-bt}) e^{a-bt} \quad (2)$$

平均成長曲線式は式(1)を説明変数 t で除した式(式3)であり、平均成長速度最大時の髄からの年輪番号(壮齢期と老齢期の境界齢, t_2)は式(3)の一次導関数式が0になるときの説明変数 t の値のうち、 t_1 よりも大きな値をとるものである。それらの条件を満たす t_2 をエクセルのソルバーを用いて算出した。

$$\frac{y}{t} = \frac{A \exp(-e^{a-bt})}{t} \quad (3)$$

3. 結果と考察

3.1 木部繊維長と孔圏道管内腔径の水平変動

木部繊維長はいずれの円板においても髄付近で短く、外側に向かって急激に増大した後、安定(Tree D)、安定後外側数年輪で低下(Tree A, B, Tree CのC-3, 4)、緩やかに増大し続け外側数年輪で低下(Tree CのC-1, 2)する変動パターンを示した(Fig. 1)。髄付近での急激な増大傾向はすべての個体、地上高で認められたことから、木部繊維長の個体発生的変動を示していると考えられる。一方で外側数年輪での低下は、低下のみられる髄からの年輪番号が個体や地上高によって異なること、同一個体内では最外年輪からの年輪数が概ね揃うことから形成層齢以外の要因による影響を受けたことによると考えられた。従ってクリの木部繊維長の個体発生的変動傾向は飽和曲線の変動であり、形成層齢以外の要因による影響は木部繊維長に対して促進・抑制の両方に作用する可能性があるため、本研究では成熟齢の推定の際に非線形区分回帰分析をそのまま適用することにした。

孔圏道管内腔径はいずれの円板においても髄付近で小さく、外側に向かって急激に増大した後、安定(Tree B, Tree CのC-1, 2)、安定後低下(Tree A, Tree CのC-3, 4, Tree DのD-1, 4)、緩やかに増大(Tree DのD-2, 3)する変動パターンを示した(Fig. 2)。孔圏道管内腔径においても木部繊維長と同様の理由から、成熟齢推定には非線形区分回帰分析をそのまま適用することにした。

3.2 肥大成長段階ごとの木部繊維長および孔圏道管内腔径の水平変動

累積年輪幅はいずれの円板においてもシグモイド型の変動傾向を示し(Fig. 3)、ゴンペルツ成長曲線式のあてはめの結果、決定係数は0.984から0.999であった。低地上高のサンプルは高地上高のサンプルに比べて肥大成長が旺盛であり、上限値も大きい傾

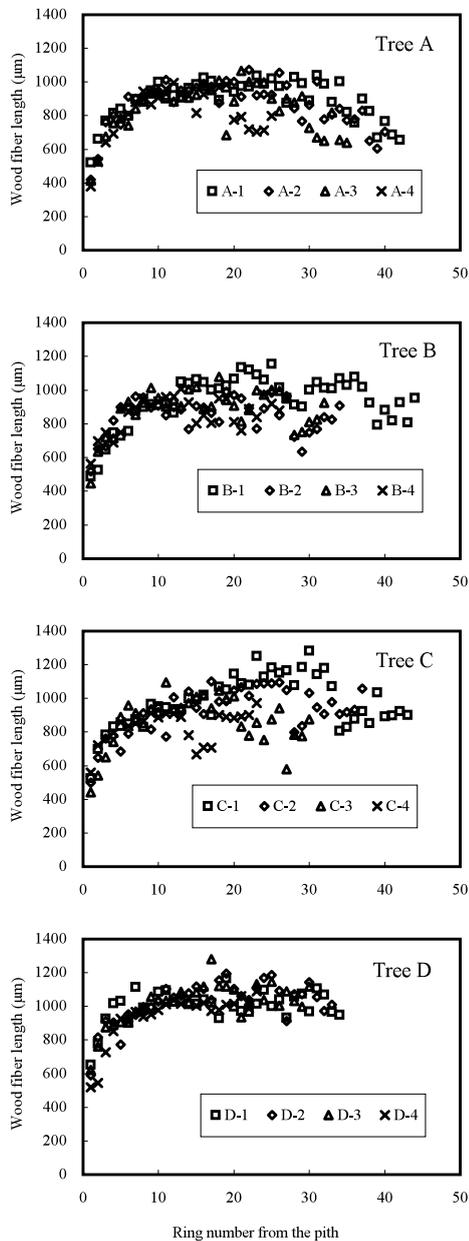


Fig. 1. Radial variation of wood fiber length with ring number from the pith.

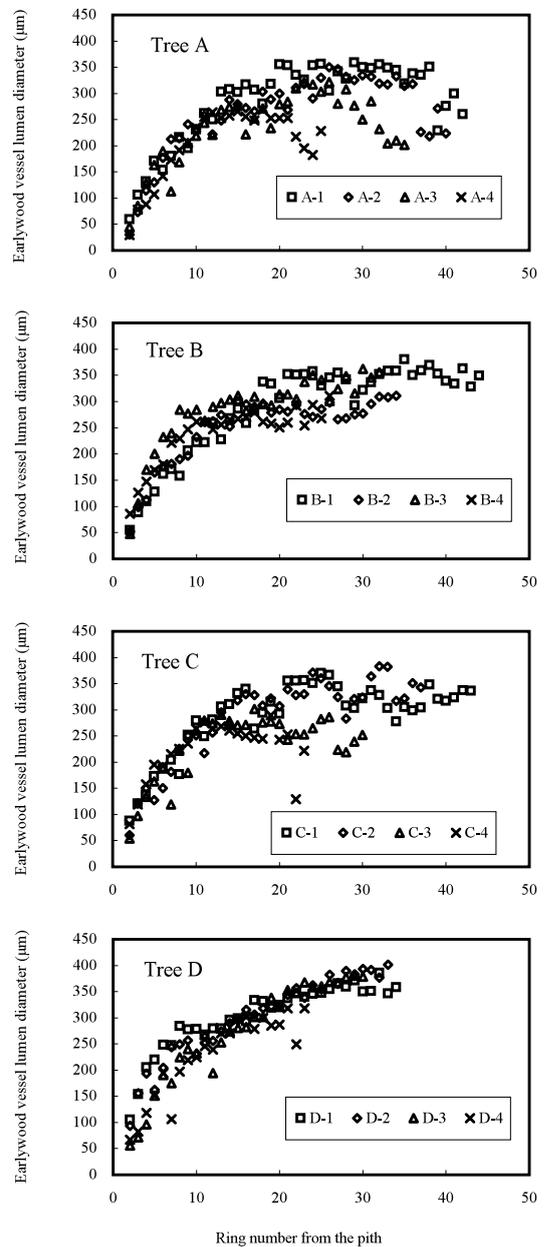


Fig. 2. Radial variation of earlywood vessel lumen diameter with ring number from the pith.

向がみられた。幼齢期と壮齢期の境界齢にあたる髄からの年輪番号 (t_1) と壮齢期と老齢期の境界齢にあたる髄からの年輪番号 (t_2) を Table 2 に示す。なお、試料番号 A-4, C-1, D-1 では t_2 は求まらなかった。

幼齢期 (年輪番号 $< t_1$) では木部繊維長, 孔圏道管内腔径のいずれにおいても増大傾向がみられた。

木部繊維長では壮齢期 ($t_1 \leq$ 年輪番号 $\leq t_2$) で安定し老齢期 ($t_2 <$ 年輪番号) で安定もしくは減少傾向が認められたのに対して孔圏道管内腔径では老齢期の始めまで増大傾向がみられる場合が多く, 老齢期以降で安定もしくは緩やかに増大した (Fig. 4)。肥大成長段階ごとの木部繊維長と孔圏道管内腔径の水平変動を直線回帰し, 傾きを求めた結果を Table 3

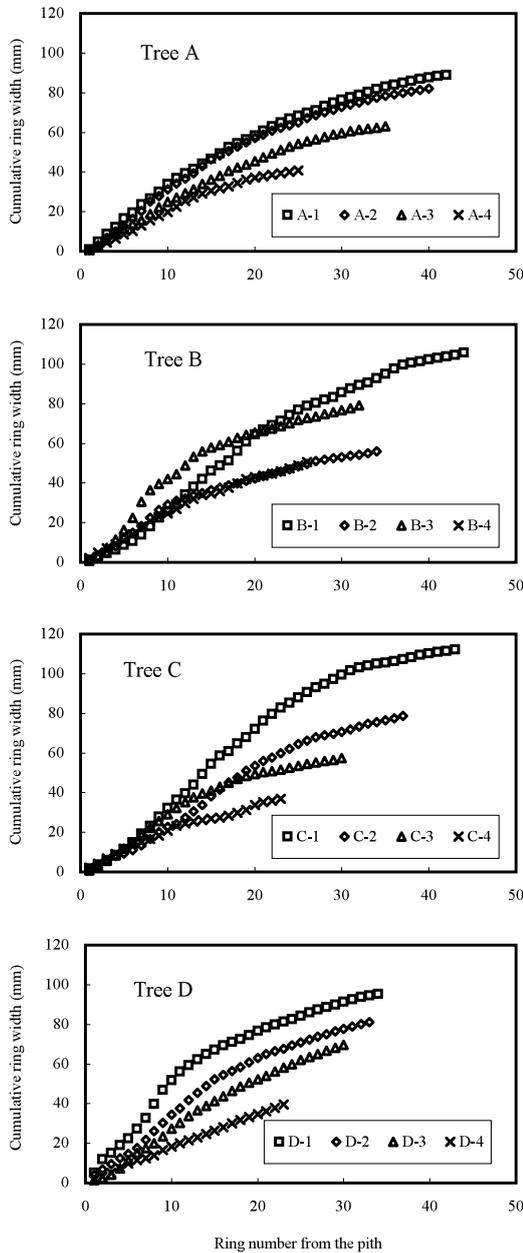


Fig. 3. Radial variation of cumulative ring width with ring number from the pith.

に示した。木部繊維長は幼齢期では全試料で有意な正の傾きを示し、老齢期では一部の試料において有意な負の傾きを示した。一方、孔圏道管内腔径は幼齢期では全試料において有意な正の傾きを示し、壮齢期では一部の試料において有意な正の傾きを、老齢期では一部の試料において有意な正あるいは負の傾きを示した。このことから木部繊維長の増大傾

Table 2. Age at the boundary between the young and middle stages (t_1), and the middle and old stages (t_2) of diameter growth.

Tree No.	Sample No.	t_1	t_2
A	A-1	11	
	A-2	11	15
	A-3	11	15
	A-4	8	13
B	B-1	14	22
	B-2	8	11
	B-3	7	11
	B-4	8	11
C	C-1	13	20
	C-2	13	20
	C-3	8	12
	C-4	7	
D	D-1	7	
	D-2	9	13
	D-3	11	16
	D-4	10	14

Note : Ages t_1 and t_2 correspond to the age at the points of maximum annual increment and maximum mean annual increment of diameter growth, respectively. The age t_2 in A-1, C-4, and D-1 could not be estimated.

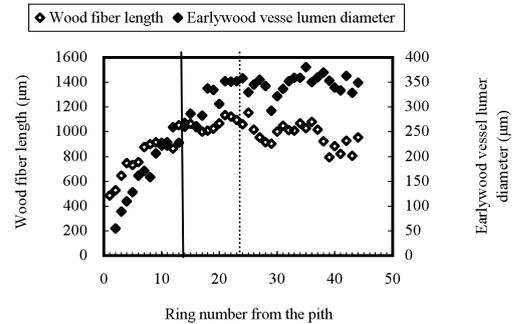


Fig. 4. Radial variation of wood fiber length and earlywood vessel lumen diameter with ring number from the pith comparing each stage of diameter growth in B-1.

Note : The solid line indicates the boundary between the young and middle stages of diameter growth and the broken line, between the middle and old stages of diameter growth. The former corresponds to the age at the point of maximum annual increment and the latter, the maximum mean annual increment.

向は幼齢期に限られるのに対して孔圏道管内腔径の増大傾向はしばしば壮齢期と老齢期まで延長されるといえる。

3.3 木部繊維長および孔圏道管内腔径の成熟齢と平均年輪幅、地上高および t_1 , t_2 との関連性
木部繊維長と孔圏道管内腔径の成熟齢は、しばし

Table 3. Slope of linear regression of wood fiber length and earlywood vessel lumen diameter in each stage of diameter growth.

Property	Sample No.	Growth stage		
		Young (age < t_1)	Middle ($t_1 \leq \text{age} \leq t_2$)	Old ($t_2 < \text{age}$)
Wood fiber length	A-2	53.10	-2.52	-13.08
	A-3	53.08	2.90	-16.23
	A-4	79.29	19.34	-19.05
	B-1	39.42	-1.08	-9.98
	B-2	73.51	-30.04	-4.11
	B-3	90.70	12.90	-6.22
	B-4	48.44	5.12	-2.95
	C-1	30.15	22.01	-15.44
	C-2	31.37	10.02	-8.74
	C-3	88.96	32.10	-15.31
	D-2	41.41	15.94	-4.32
	D-3	40.49	15.07	-8.18
	D-4	57.34	13.72	7.52
	Earlywood vessel lumen diameter	A-2	26.52	11.07
A-3		18.16	11.66	-2.10
A-4		26.69	14.26	-5.92
B-1		16.85	11.28	0.45
B-2		26.97	24.77	0.94
B-3		46.33	4.77	3.03
B-4		24.56	10.81	2.23
C-1		18.70	-3.15	-1.76
C-2		18.15	3.71	0.46
C-3		33.83	16.25	-0.84
D-2		23.33	5.96	5.72
D-3		24.84	10.14	5.81
D-4		19.62	11.63	-0.12

Note: Bold face indicates that the slope is significant at the 5% level. The data of A-1, C-4, and D-1 were omitted because those at age t_2 could not be estimated.

ば大きく乖離し、概して孔圏道管内腔径の成熟齢の方が木部繊維長の成熟齢よりも大きな値を示した (Table 4)。この結果は環孔材において両者が近似することを示した既往の報告^{9,12)}と異なっていたが、本報告と既往の報告で成熟齢の算出方法が異なることが結果に影響を与えた可能性がある。本報告と同じ方法によって算出したコナラの木部繊維長と孔圏道管内腔径の成熟齢では本報告と同様の結果が得られている¹⁸⁾。平均年輪幅あるいは地上高との関連性をみると、木部繊維長の成熟齢との間には有意な相関関係がみられなかったのに対して、孔圏道管内腔径の成熟齢と平均年輪幅の間には有意な正の相関関係 ($r_s = 0.679$, $p = 0.004$) が、地上高との間には有意な負の相関関係 ($r_s = -0.659$, $p = 0.006$) がみられた。ただし、平均年輪幅と地上高の間には高い負の相関関係 ($r_s = -0.672$, $p = 0.004$) がみられたことから、孔圏道管内腔径の成熟齢と平均年輪幅

Table 4. Maturation age of wood fiber length and earlywood vessel lumen diameter.

Tree No.	Sample No.	Maturation age (year)	
		Wood fiber length	Earlywood vessel lumen diameter
A	A-1	9	22
	A-2	7	19
	A-3	9	18
	A-4	8	13
B	B-1	15	27
	B-2	6	17
	B-3	8	13
	B-4	9	14
C	C-1	20	20
	C-2	18	23
	C-3	7	14
	C-4	6	11
D	D-1	5	28
	D-2	14	36
	D-3	13	30
	D-4	9	19

あるいは地上高はどちらか一方と関連している可能性も考えられる。

木部繊維長および孔圏道管内腔径の成熟齢と肥大成長段階の境界齢 (t_1 , t_2) との間には興味深い関連性が認められた。すなわち、木部繊維長の成熟齢は幼齢期と壮齢期の境界齢 (t_1) に近似し、孔圏道管内腔径の成熟齢は一部の試料を除いて壮齢期と老齢期の境界齢 (t_2) に近似した。これは、木部繊維長が幼齢期のみで顕著に増大し、孔圏道管内腔径が老齢期の始めまで増大傾向を示したことと関連していると考えられた。

木部繊維長や道管内腔径は葉量や葉までの距離に影響を受けることが示唆されており¹⁹⁻²¹⁾、ある地上高部位での肥大成長量はそれより上部の葉量や葉までの距離に関連し、樹幹肥大成長曲線式のパラメータに影響を与えることが指摘されている²²⁾。葉は木部細胞形態に影響を与える植物ホルモンの生成の場である²³⁾と共に関同化産物の生成の場でもあることから、葉量や葉までの距離の経年変動は木部繊維長や孔圏道管内腔径の水平変動と累積年輪幅の水平変動の両方に関連すると考えられる。従って、ある地上高部位での木部繊維長や孔圏道管内腔径の水平変動と累積年輪幅の水平変動はそれより上部での葉の空間的展開の仕方によって説明されるかもしれない。さらに、ゴンペルツ成長曲線式の変曲点 (幼齢期と壮齢期の境界) における目的変数の値は上限値の $1/e$ である²⁴⁾ ことから、本研究の結果は、ある断面高における木部繊維長の安定部位がその断面高で

の樹幹の肥大成長が停止するまでに到達し得る最大半径の約37%に相当する位置に存在することを意味している。この点に関してはクリ以外の様々な樹種を用いて確かめる必要があると思われる。

4. ま と め

肥大成長の成長段階ごとに木部繊維長と孔圏道管内腔径の水平変動を調べ、以下の結果を得た。

- 1) 木部繊維長の水平変動には髄から外側に向かって急激に増大した後、安定的に推移するパターン、安定後樹幹外側の数年輪で低下するパターン、緩やかに増大し続けた後外側数年輪で低下するパターン、が認められた。いずれの試料においても木部繊維長は肥大成長段階の幼齢期に顕著に増大し、壮齢期で安定し、老齢期では安定または減少傾向を示した。
- 2) 木部繊維長の成熟齢（変動の安定する髄からの年輪番号）は平均年輪幅や地上高との間に有意な相関関係を示さず、肥大成長段階との間に関連性を示した。すなわち木部繊維長の成熟齢は幼齢期と壮齢期の境界齢付近に存在した。
- 3) 孔圏道管内腔径の水平変動には髄から外側に向かって急激に増大した後、安定的に推移するパターン、安定後樹幹外側数年輪で低下するパターン、緩やかに増大し続けるパターン、が認められた。いずれの試料においても幼齢期に顕著な増大傾向がみられ、壮齢期では安定傾向と増大傾向が、老齢期では安定、増大、減少傾向がみられた。
- 4) 孔圏道管内腔径の成熟齢は平均年輪幅との間に有意な正の相関関係を、地上高との間に有意な負の相関関係を示した。孔圏道管内腔径の成熟齢は木部繊維長の成熟齢よりも遅く、一部を除いて肥大成長の壮齢期と老齢期の境界齢付近に存在した。

謝 辞

本研究の実験を手伝って頂いた辻えりか氏に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 古川郁夫：“組織と材質”，古野 毅, 澤辺 功編, 海青社, 大津, 1994, p. 113.

- 2) Zobel, B. J., Buijntensen J. P. : “Wood variation-its cause and control”, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1989, p. 82.
- 3) 塩倉高義：木材学会誌 **28**(2), 85-90 (1982).
- 4) Lee, C. H., Wang, S. Y. : *IAWA J.* **17**(2), 125-131 (1996).
- 5) 塩倉高義：“木材の構造”，原田 浩, 佐伯 浩編, 文永堂出版, 東京, 1985, pp. 168-179.
- 6) Gartner, B. L., Lei, H., Milota, M. R. : *Wood and Fiber Sci.* **29**(1), 10-20 (1997).
- 7) Helińska-Raczkowska, L., Fabisiak, E. : *IAWA Bull n. s.* **12**(3), 257-262 (1991).
- 8) Peszlen, I. : *IAWA J.* **15**(3), 311-321 (1994).
- 9) Lei, H., Milota, M. R., Gartner, B. L. : *IAWA J.* **17**(4), 445-461 (1996).
- 10) 黄 榮鳳, 古川郁夫：木材学会誌 **46**(6), 495-502 (2000).
- 11) Bhat, K. M., Priya, P. B., Rugmini, P. : *Wood Sci. Technol.* **34**(6), 517-532 (2001).
- 12) Helińska-Raczkowska, L. : *Ann. Sci. For.* **51**(3), 283-290 (1994).
- 13) Helińska-Raczkowska, L., Fabisiak, E. : *Holz. Alz Roh-Werkstoff.* **57**(4), 283-286 (1999).
- 14) 土屋竜太, 古川郁夫：木材学会誌 **53**(4), 180-186 (2007).
- 15) 大友栄松：“林業実務必携”，東京農工大学農学部林学科編, 朝倉書店, 東京, 1987, p. 58.
- 16) 片岡寛純：“造林学”，川名 明, 片岡寛純編, 朝倉書店, 東京, 1992, p. 13
- 17) Liao, C. Y., Podrázský, V. V., Liu, G. B. : *J. For. Sci.* **49**(12), 544-551 (2003).
- 18) Tsuchiya, R., Furukawa, I. : *IAWA J.* Submitted.
- 19) Aloni, R., Zimmermann, M. H. : *Differentiation* **24**(3), 203-208. (1983).
- 20) 雉子谷佳男, 小田一幸, 堤 壽一：木材学会誌 **40**(11), 1239-1242 (1994).
- 21) 雉子谷佳男, 小田一幸, 堤 壽一：木材学会誌 **41**(11), 1043-1048 (1995).
- 22) Zeide, B. : *Ecol. Model.* **175**(3), 249-259 (2004).
- 23) Aloni, R. : *J. Plant Growth Regul.* **20**(1), 22-34 (2001).
- 24) Zeide, B. : *For. Sci.* **39**(3), 594-616 (1993).