

ケヤキ (*Zelkova serrata* Makino) あて材ゼラチン層の 物性・機能に関する研究

荒川義治¹・阿部賢太郎¹・山本浩之¹・奥山 剛¹・鈴木拓雄²

引張あて材にみられる大きな引張の成長応力、軸方向ヤング率、軸方向収縮率について それらの発生に及ぼすゼラチン層の寄与を検討した。65年生のケヤキ (*Zelkova serrata* Makino) について木部表面成長応力解放ひずみを測定し、その後測定点近傍から採取したブロックの軸方向ヤング率、軸方向収縮率を測定した。また、光学顕微鏡観察に基づいて木部繊維領域に占めるゼラチン繊維の個数割合とゼラチン層の面積率を測定し、複合則を用いてゼラチン層の物性を推定した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 生材状態でのゼラチン層の軸方向ヤング率は木化層の1.46倍もしくはそれ以上である。
- (2) 軸方向成長応力解放ひずみは木化層の23.6倍に達する。
- (3) 軸方向収縮率は木化層の30.8倍になる。

以上は引張あて材にみられる種々の特異な物性はゼラチン層の性質によるものであることを示している。

キーワード：引張あて材、ゼラチン層、ヤング率、成長応力、収縮

緒言

樹幹が生立時に何らかの原因によって傾斜刺激を受けると、あて材と呼ばれる特殊な材を局所的に形成する。あて材は正常材と比較して、組織構造と物性が大きく異なっている(尾中 1949)。あて材の形成は、製材・乾燥時に板や柱材の曲がり、反り、あるいは割れといった加工障害を引き起こし、丸太の利用歩留まりを低下させるだけでなく材料としての価値をも著しく損ねる原因となっている。そのような障害を避けるためにも、あて材の性質及びその性質の原因となるものを知ることは非常に重要な課題である。

あて材には、針葉樹に形成される圧縮あて材と広葉樹に形成される引張あて材とがある。本研究では特に引張あて材を取り上げ、その性質を分析した。引張あて材繊維は通常の木部繊維細胞には見られないゼラチン層(G層)と呼ばれる特有の層を持つことが多い。それゆえ、ゼラチン繊維(G繊維)と呼ばれる。引張あて材が示す種々の性質の発現には、G層の性質が関与しているものと考えられている(Norberg and Meier 1966; Okuyama *et al.* 1990, 1994; Yamamoto *et al.* 1992, 1993; 山本・奥山 1994)。ここで言う引張あて材に固有の性質とは現在までの研究から以下のことが挙げられている。

- (1) 繊維方向(軸方向)に大きな引張の成長応力の発生(Okuyama *et al.* 1990; Yamamoto *et al.* 1992, 1993)。

(2) 乾燥に伴う軸方向への大きな収縮(Yamamoto *et al.* 1992; Clair and Thibaut 2001)。

(3) 正常材に比べて大きい軸方向弾性係数(軸方向ヤング率)(Okuyama *et al.* 1990; Yamamoto *et al.* 1992)。

本研究では、引張あて材の特異な性質の発現に及ぼすG層の寄与を明らかにするために、ケヤキ引張あて材を対象として、軸方向成長応力、軸方向ヤング率、軸方向収縮率を測定し、さらに組織構造の特異性との関連性を検討した。

実験方法

1. 供試樹木と試験体採取

供試樹木には、山梨大学工学部運動場において、ほぼ鉛直に生育していた65年生のケヤキ(*Zelkova serrata* Makino) 1個体を用いた。胸高周囲長は170cmであった。

2000年5月に供試樹木胸高部位にて、円周状に8ヶ点ほぼ等間隔に測定点を設定し、樹皮および分化帯を剝離したのち、木部表面に電気抵抗式ひずみゲージ(ゲージ長8mm, ポリイミドベース)をシアノアクリレート系瞬間接着剤を用いて貼り付け、軸方向成長応力解放ひずみ(ϵ_L)を測定した。測定は立木の状態で行った。測定後、測定点近傍と繊維方向に連続するブロックを採取し、試験片を作成したのち軸方向収縮率(α_L)と軸方向ヤング率(E_L)を測定した。

¹名古屋大学大学院生命農学研究科 生物材料物理学研究室

¹Laboratory of Bio-material Physics, Graduate School of Bioagricultural Science, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan

²山梨大学工学部土木環境工学科

²Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Yamanashi University, Kofu 400-8511, Japan

(受理：2003年11月30日)

なお軸方向収縮率と軸方向ヤング率の測定のための試験片は、成長応力解放ひずみ測定点1ヶ点につき2〜3個作成した。

2. 木口面組織面積率の測定

成長応力解放ひずみ、軸方向収縮率、軸方向ヤング率を測定した試験片ブロックからスライディングミクロトームを用いて木口切片(厚さ12 μm)を作成した。2%サフラン溶液(50%エタノール溶液)ならびに0.5%ファーストグリーン溶液(100%エタノール)で二重染色を行った。エタノールシリーズで脱水したのち、キシレンに置換し、エテンランを用いて封入することによって永久プレパラートとし、光学顕微鏡観察に供した。

低倍率(対物レンズ5倍、画像解析モニター上150倍)による観察では2〜3年輪分を観察視野に収めるような画像(2.8mm \times 1.5mm)を各試験片につき3〜4枚、パーソナルコンピュータに取り込み、画像解析ソフト(MacSCOPE Ver 2.65)を用いて道管、放射組織、木部繊維、軸方向柔組織の各組織の面積率を測定した。

続く高倍率(対物レンズ40倍、画像解析モニター上1200倍)による観察では、木部繊維のみからなる領域(木部繊維領域)をとらえ、各試験片につき、まんべんなく6〜9枚の画像(160 μm \times 80 μm)をパーソナルコンピュータに取り込み、画像解析ソフト(MacSCOPE Ver 2.65)を用いて木化層、ゼラチン層および内腔面積率を測定した。また同時に測定視野に占める木部繊維およびゼラチン繊維の占有率をも測定した。

測定した項目をまとめると以下ようになる。

- 道管面積率(V): パーソナルコンピュータにとり込んだ低倍率画像に占める道管内腔面積の総和をとり込んだ画像の全面積で割ったもの。
- 木部繊維領域面積率(F): パーソナルコンピュータにとり込んだ低倍率画像に占める木部繊維領域面積の総和をとり込んだ画像の全面積で割ったもの。よってこの中には内腔の面積も含まれる。
- 放射組織面積率(R): パーソナルコンピュータにとり込んだ低倍率画像に占める放射組織面積の総和をとり込んだ

画像の全面積で割ったもの。

- 軸方向柔組織面積率(P): $1-(V+F+R)$ で換算する。
- 木部繊維領域内木化層面積率(s): パーソナルコンピュータにとり込んだ高倍率画像に占める木化層面積の総和を取り込んだ画像の全面積で割ったもの。
- 木部繊維領域内ゼラチン層面積率(g): パーソナルコンピュータにとり込んだ高倍率画像に占めるゼラチン層面積の総和を取り込んだ画像の全面積で割ったもの。
- 木部繊維領域内細胞壁面積率: $s+g$ で換算する。
- ゼラチン繊維占有率(ϕ): パーソナルコンピュータにとり込んだ高倍率画像で計測した全木部繊維数(N)に対するゼラチン繊維数(N_g)の個数割合。 $\phi=N_g/N$ で換算する。

3. 軸方向収縮率(α_L)測定法

成長応力解放ひずみ測定点の近傍から採取したブロックをオートクレーブで煮沸した(10分 \times 3回)のち、試験片を作成した。試験片の寸法は50 \times 10 \times 5mm(LTR各方向)である。塩類飽和溶液調整法(20 $^{\circ}\text{C}$)により試験片を段階的に乾燥させた。用いた調湿試薬は H_2O 、 KNO_3aq 、 NaClaq 、 P_2O_5 粉末である。各調湿段階で定期的に質量を測定し、質量が平衡に達した時点でコンパレータ(読み取り精度0.001mm)を用いて寸法を測定した(Yamamoto *et al.* 1992)。なお、軸方向収縮率(α_L)は次式を用いて算出した。

$$\alpha_L = \frac{l_{wet} - l_{dry}}{l_{wet}} \cdot 100$$

l_{wet} : 飽水状態の軸方向の寸法(mm)

l_{dry} : P_2O_5 乾燥後の軸方向の寸法(mm)

4. 軸方向ヤング率(E_L)測定法

成長応力解放ひずみ測定点の近傍からブロックを採取し、試験片を作成した。試験片の寸法は70 \times 10 \times 5mm(LTR各方向)である。卓上材料試験器(今田製作所, SH-10)を用いて生材状態で引張り試験を行い、応力-ひずみ曲線を得た。応力-ひずみ曲線の比例限度内での直線の傾きを求め、それをそのブロックの軸方向ヤング率(E_L)とした。

表-1. 各試験体の軸方向ヤング率、軸方向収縮率および解放ひずみのデータ

測定点	1	2	3	4	5	6	7	8
解放ひずみ ($\mu\epsilon$)	-2960	-248	-1942	-1604	-2230	-1883	-442	-3057
軸方向収縮率 (%)	1.06	0.09	0.36	0.73	1.17	0.84	0.11	0.51
	1.07	0.18	0.16	0.72	0.80	0.26	0.08	0.20
			0.23	0.39	0.49	0.33		
軸方向ヤング率 (GPa)	6.19	7.60	7.80	9.06	7.23	6.13	6.72	6.53
	8.18	6.97	7.54	7.40	6.77	8.92	6.37	7.63
			6.41	8.02	6.14	8.17		

注) いくつかの測定点で軸方向収縮率、軸方向ヤング率の値が複数記載されているが、これは相当数の試験片を作成し、測定を行ったことによる。

以上の実験から得られた成長応力解放ひずみ、軸方向収縮率、軸方向ヤング率のデータを表-1 に示す。

結果と考察

1. 木部繊維の軸方向ヤング率 (E_L^f)

試験体を横断面で見ると、道管、木部繊維、軸方向柔組織及び放射組織が並列に配置されている。それぞれの組織の軸方向ヤング率を E_L^f , E_L^f , E_L^f , E_L^f とすると、複合則により材ヤング率 (E_L) は

$$E_L = V \cdot E_L^f + F \cdot E_L^f + P \cdot E_L^f + R \cdot E_L^f$$

で表すことができる。

ここで細胞の形状等の理由から木部繊維以外の組織の、木材の長軸に沿う方向のヤング率は木部繊維のそれよりも著しく低いとみなせるから、上式は

$$E_L = F \cdot E_L^f$$

となる。したがって木部繊維の軸方向ヤング率は

$$E_L^f = \frac{E_L}{F}$$

で与えられることになる。

2. 正常繊維・ゼラチン繊維の物性

2-1 軸方向ヤング率

木部繊維領域は正常繊維とゼラチン繊維が半径断面(木口面)でみたとき並列的に配置することによって成り立っている。木部繊維領域の軸方向ヤング率 E_L^f は、ゼラチン繊維の軸方向ヤング率 E_L^g 、正常繊維の軸方向ヤング率 E_L^N 、およびゼラチン繊維占有率 (ϕ) を用いることにより複合則から

$$E_L^f = \phi \cdot E_L^g + (1 - \phi) \cdot E_L^N \\ = (E_L^g - E_L^N) \cdot \phi + E_L^N \quad (1)$$

で与えられる。

さて、式(1)は E_L^f と ϕ とが直線関係にあることを示唆している。そこで両者の関係を最小二乗法によって直線近似し、 E_L^g , E_L^N を推定する。図-1 に実測に基づく E_L^f と ϕ との関係を示す。ゼラチン繊維占有率 (ϕ) の増加に伴い、木部繊維の軸方向ヤング率 (E_L^f) は増加する傾向にある。最小二乗法によって得られた直線式と式(1)との比較から

$$E_L^g = 22.70 \text{ (GPa)} \quad E_L^N = 29.79 \text{ (GPa)} \quad (2)$$

を得る。このことからゼラチン繊維の軸方向ヤング率は正常繊維の 1.31 倍になる事がわかった。

2-2 成長応力解放ひずみ (解放ひずみ)

木部繊維は、細胞壁二次壁の成熟の過程(木化過程)で長軸方向および直径方向に寸法変化しようとする(Yamamoto 1998)。実際の二次木部ではこの寸法変化は拘束され結果として新生木部に異方的な成長応力が発生する。解放ひずみは、観測的には細胞が示す寸法変化(成長ひずみ)に相当するものと考えられる。いま、正常繊維が示す成長ひずみを ε_L^N 、また、ゼラチン繊維の成長ひずみ

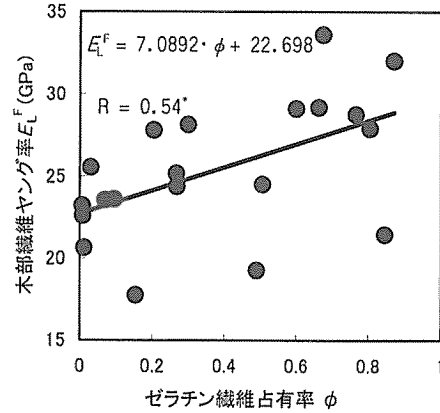


図-1. 木部繊維領域の軸方向ヤング率 (E_L^f) とゼラチン繊維占有率 (ϕ) との関係

を ε_L^f とする。しかし、2種類の繊維が混在する実際の木部ではこれらの値とは異なる値(解放ひずみ)をとる。そこで、実測された解放ひずみ ε_L を ε_L^N と ε_L^g を用いて表してみる。

正常繊維は、自由寸法変化が許されるならば ε_L^N の成長ひずみを発生する。材の解放ひずみは ε_L であることを考慮すれば、表面成長応力解放後の試験片における正常繊維には応力 (σ_L^N) が残留することになる。その値はフックの法則を仮定すれば

$$\sigma_L^N = E_L^N \cdot (\varepsilon_L - \varepsilon_L^N) \quad (3)$$

と表せる。

ゼラチン繊維の場合も同様に、応力 (σ_L^g) として

$$\sigma_L^g = E_L^g \cdot (\varepsilon_L - \varepsilon_L^g) \quad (4)$$

が残留すると考えられる。

表面成長応力解放後の試験片ブロック全体としての応力のつり合い条件は、ゼラチン繊維占有率 (ϕ) を用いて

$$\phi \cdot \sigma_L^g + (1 - \phi) \cdot \sigma_L^N = 0 \quad (5)$$

で与えられる

式(3), (4) 及び (5) から、 ε_L について解くと以下のようになる。

$$\varepsilon_L = \frac{(\varepsilon_L^g \cdot E_L^g - \varepsilon_L^N \cdot E_L^N) \phi + \varepsilon_L^N \cdot E_L^N}{(E_L^g - E_L^N) \phi + E_L^N} \quad (6)$$

式(6)は、材の解放ひずみ (ε_L) とゼラチン繊維占有率 (ϕ) とが双曲線の関係にあることを示唆している。そこで、実測される ε_L と ϕ との関係は双曲線によって最小二乗近似すると図-2 に示すような曲線となる。なお得られた双曲線の式と式(6)とを比較するのであるが、ヤング率 (E_L^g , E_L^N) の値については結果(2)を代入する。以上により

$$\varepsilon_L^N = -176(\mu\varepsilon) \quad \varepsilon_L^g = -2487(\mu\varepsilon) \quad (7)$$

を得る。このことからゼラチン繊維、正常繊維とも成長ひずみは収縮であり、前者は後者の 14.1 倍にも達する。

2-3 軸方向収縮率

乾燥による軸方向収縮変形についても、成長応力解放ひ

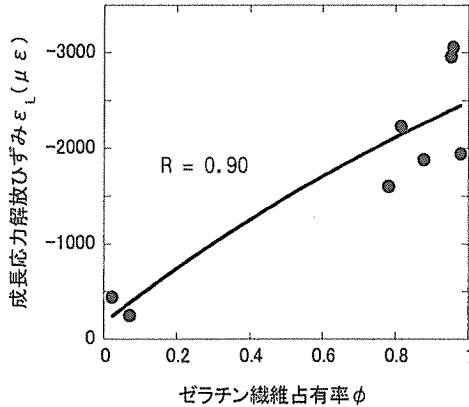


図-2. 成長応力解放ひずみ (ϵ_L) とゼラチン繊維占有率 (ϕ) との関係

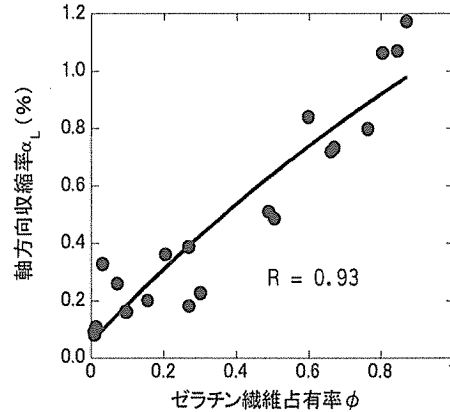


図-3. 軸方向収縮率 (α_L) とゼラチン繊維占有率 (ϕ) との関係

ずみの場合と同様の考え方が適用できる。いま、水分放出による正常繊維の軸方向収縮率を α_L^N 、また、ゼラチン繊維のそれを α_L^G 、また、これらの繊維が混在する場合(木材試験片)の軸方向収縮率を α_L とすると以下の関係を得る。

$$\alpha_L = \frac{(\alpha_L^G \cdot E_L^G - \alpha_L^N \cdot E_L^N)\phi + \alpha_L^N \cdot E_L^N}{(E_L^G - E_L^N)\phi + E_L^N} \quad (8)$$

式(8)は、材の軸方向収縮率 (α_L) とゼラチン繊維占有率 (ϕ) とが双曲線の関係にあることを示している。ヤング率 (E_L^N, E_L^G) の値については成長応力解放ひずみの場合と同様に結果(2)を用いる。式(8)をもとに実測される α_L と ϕ との関係に適合する α_L^N, α_L^G を推定すると

$$\alpha_L^G = 1.083(\%) \quad \alpha_L^N = 0.0591(\%) \quad (9)$$

となる。このことから、ゼラチン繊維の軸方向収縮率は、正常繊維のその18.3倍にあたる。

3. ゼラチン層および木化層の性質

3-1 木部繊維細胞の正六角形近似による面積の算出

本項目では、木部繊維1本をゼラチン層と木化層との並列複合体と考え、これに複合則を適用する。単純化のために繊維細胞の横断面形状を全て同じ大きさの正六角形と考えて、その寸法を決定する。

木部繊維領域のみを観察している状態を考えてみる。全視野面積(木部繊維のみからなる)を A とする。そこに占める木部繊維数は N 本、このうちゼラチン繊維数は N_g 本である。すると正常繊維数は $N_n (= N - N_g)$ となる。ここで、木部繊維一本の横断面を図-4のように正六角形近似する。

面積 A と木部繊維数 N との関係は

$$A = 2\sqrt{3}x^2N \quad (10)$$

となる。 A, N は実験によって既知なので x の値が算出できる。

つぎに、全視野における正常繊維の木化層の面積は正常繊維全体が占める面積からその内腔の面積を引いたものであり $2\sqrt{3}N_n(x^2 - x_1^2)$ となる。

ゼラチン繊維においてもゼラチン繊維全体の面積から木

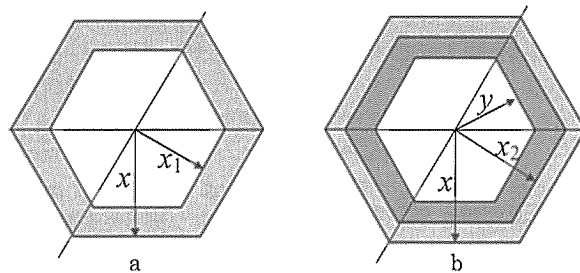


図-4-a, b. 木部繊維細胞横断面の正六角形近似

a. 正常繊維

b. ゼラチン繊維

x, x_1, x_2, y : 細胞中心から各壁層への最短距離

化層以外の面積(ゼラチン層および内腔の面積)を引いて $2\sqrt{3}N_g(x^2 - x_2^2)$ となる。木部繊維領域内木化層面積率(s)はこの二つの面積の和を A で割ったものであり、

$$s = \frac{2\sqrt{3}N_n(x^2 - x_1^2) + 2\sqrt{3}N_g(x^2 - x_2^2)}{A} \quad (11)$$

で与えられる。これをゼラチン繊維占有率(ϕ)を用いて変形すると

$$s = \left(1 - \frac{x_1^2}{x^2}\right) - \frac{x_2^2 - x_1^2}{x^2}\phi \quad (12)$$

を得る。

木部繊維領域内ゼラチン層面積率(g)についても同様に

$$g = \frac{2\sqrt{3}N_g(x_2^2 - y^2)}{A} = \frac{x_2^2 - y^2}{x^2}\phi \quad (13)$$

式(12), (13)は s, g と ϕ に対して直線関係にあることを示している。図-5に実測された s と ϕ, g と ϕ との関係を示す。そこで、実測された s, g のそれぞれと ϕ との関係直線式を用いて最小二乗近似し、傾き・切片を求め、これから各寸法の値 (x, x_1, x_2 および y) を決定する。こうして正常繊維木化層、ゼラチン繊維木化層およびゼラチン層の厚さが決定される。また、繊維一本当りの木化層及びゼラチン層の面積率も求められる(表-2)。

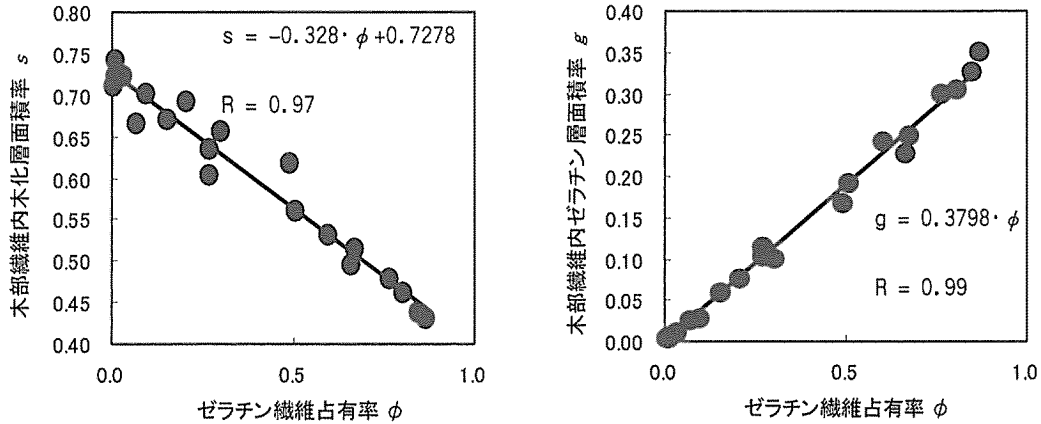


図-5. 木部繊維領域内木化層面積率 (s) およびゼラチン層面積率 (g) とゼラチン繊維占有率 (φ) との関係

表-2 木化層・ゼラチン層の面積率(%)

	単一の木部繊維中*		細胞壁中**	
	木化層	ゼラチン層	木化層	ゼラチン層
正常繊維	72.78	0	100	0
ゼラチン繊維	39.98	37.98	51	49

* 内腔を含めたときの面積率
 ** 内腔を含めないときの面積率

3-2 軸方向ヤング率

2-1 で求めた正常繊維の軸方向ヤング率 (E_N^ℓ) には内腔の部分も含まれているが、実際には内腔は力学的には寄与しないので、木化層実質の軸方向ヤング率 E_ℓ^ℓ は

$$E_{N}^{\ell} = 0.7278 \cdot E_{\ell}^{\ell} \tag{14}$$

で与えられる。右辺の係数は 3-1 で決定した繊維一本中の木化層面積率である。

したがって、結果 (2) から木化層の軸方向ヤング率 (E_ℓ^ℓ) は

$$E_{\ell}^{\ell} = 31.19(\text{GPa}) \tag{15}$$

で与えられる。同様に、ゼラチン繊維の軸方向ヤング率 E_ℓ^ℓ は木化層の軸方向ヤング率 (E_ℓ^ℓ) とゼラチン層の軸方向ヤング率 E_ℓ^ℓ を用いて

$$E_{\ell}^{\ell} = 0.3998 \cdot E_{\ell}^{\ell} + 0.3798 \cdot E_{\ell}^{\ell} \tag{16}$$

で得られる。右辺の係数はゼラチン繊維一本中の木化層面積率及びゼラチン層面積率である。(2), (15) からゼラチン層の軸方向ヤング率 (E_ℓ^ℓ) は次のように求められる。

$$E_{\ell}^{\ell} = 45.59(\text{GPa}) \tag{17}$$

以上から、ゼラチン層の軸方向ヤング率は木化層の軸方向ヤング率の 1.46 倍程度になることが結論される。

3-3 成長応力解放ひずみ (解放ひずみ)

正常繊維では細胞壁は木化層だけからなる。したがって正常繊維の成長ひずみは木化層の成長ひずみ (ε_ℓ^ℓ) であると考えられる。すなわち結果 (7) から

$$\varepsilon_{N}^{\ell} = \varepsilon_{\ell}^{\ell} = -176(\mu\varepsilon) \tag{18}$$

である。

ゼラチン繊維一本の横断面では、ゼラチン層と木化層が

並列に配置している。複合則を用いてゼラチン繊維の成長ひずみ (ε_ℓ^ℓ) と木化層及びゼラチン層の成長ひずみ (それぞれ ε_ℓ^ℓ, ε_ℓ^ℓ) との関係を定式化し, (7), (15), (17), (18) を代入することによって

$$\varepsilon_{\ell}^{\ell} = -4151(\mu\varepsilon) \tag{19}$$

を得る。したがって、ゼラチン層の解放ひずみは木化層の 23.6 倍になるものと考えられる。

以上から、ゼラチン層は木化層に比べ、非常に大きな引張の応力を発生している。すなわち、成熟過程において繊維方向に著しく収縮しようとする性質を示すものと考えられる。

3-4 軸方向収縮率

収縮率についても同様の考察を行うことが可能である。正常繊維の軸方向収縮率は木化層のそれと等しい, 結果 (9) から

$$\alpha_{N}^{\ell} = \alpha_{\ell}^{\ell} = 0.0591 (\%) \tag{20}$$

である。

ゼラチン繊維ではゼラチン層と木化層が並列に配置している。複合則を用いてゼラチン繊維の軸方向収縮率 (α_ℓ^ℓ) をゼラチン層、木化層の軸方向収縮率 (それぞれ α_ℓ^ℓ, α_ℓ^ℓ) を用いて定式化し, (9), (15), (17), (20) を代入することにより

$$\alpha_{\ell}^{\ell} = 1.820 (\%) \tag{21}$$

を得る。これにより、ゼラチン層の軸方向収縮率は木化層のその 30.1 倍にあたるものと考えられる。

以上から、ゼラチン層は水分放出によって、軸方向に大きく収縮する性質を持ち、その性質ゆえ引張あて材は軸方向に大きく収縮するものと考えられる。

結 論

本研究では、引張あて材を含むケヤキについて、軸方向ヤング率、成長応力解放ひずみ、および収縮率の実測を行い、結果を木部の解剖学的特徴と比較した。さらに木部繊

維細胞の横断面を正六角形に近似したモデルにより、ゼラチン層そのものの挙動について定量的な考察を行った。その結果以下のようなことが明らかとなった。

- (1) ゼラチン繊維の割合が増えると、木部繊維領域の軸方向ヤング率、成長応力解放ひずみ、軸方向収縮率も大きくなる傾向にある。
- (2) ゼラチン繊維の軸方向ヤング率は、正常繊維のそのの1.31倍、ゼラチン層の軸方向ヤング率は木化層の1.46倍もしくはそれ以上である。
- (3) ゼラチン繊維の成長応力解放ひずみは、正常繊維の14.1倍にも達する。
- (4) ゼラチン層の成長応力解放ひずみは、木化層の23.6倍にもなる。
- (5) ゼラチン繊維の軸方向収縮率は正常繊維の18.3倍、ゼラチン層の軸方向収縮率は木化層の30.8倍にも達する。

以上のことから、引張あて材にみられる特異な物性は、ゼラチン層そのものの性質が大きくかかわっていると考えられる。

謝 辞

試験樹木を手配して頂いた平嶋健一教授（山梨大学大学院工学研究科自然機能開発専攻）に深く感謝申し上げます。

引用文献

- Clair B. and Thibaut B. (2001) Shrinkage of the Gelatinous Layer of Poplar and Beech Tension Wood. *IWA Journal* 22 (2): 121-131.
- Norberg H. and Meyer H. (1966) Physical and Chemical Properties of the Gelatinous Layer in Tension Wood Fibers of Aspen (*Populus tremula* L.). *Holzforschung* 20: 174-178
- Okuyama T., Yamamoto H., Iguti M. and Yoshida M. (1990) Generation process of Growth Stresses in Cell Walls II. Growth Stresses in tension wood. *Mokuzai Gakkaishi* 36 (10): 797-803.
- Okuyama T., Yamamoto H., Yoshida M., Hattori Y. and Archer R.R. (1994) Growth Stresses in Tension Wood-Role of Microfibrils and Lignification. *Annales des Sciences Forestieres* 51 (3): 291-300.
- 尾中文彦 (1949) アテの研究. 木材研究 1: 1-88.
- Yamamoto H., Okuyama T., Sugiyama K. and Yoshida M. (1992) Generation process of Growth Stresses in Cell Walls IV. Action of the cellulose microfibril upon the generation of the tensile stresses. *Mokuzai Gakkaishi* 38 (2): 107-113.
- Yamamoto H., Okuyama T. and Yoshida M. (1993) Generation process of Growth Stresses in Cell Walls V. Model of tensile stress generation in gelatinous fibers. *Mokuzai Gakkaishi* 39 (2): 118-125.
- 山本浩之・奥山 剛 (1994) あての程度の定量化(その2)―広葉樹あて材の成長応力と組織―. 木材工業 49(1): 20-23.
- Yamamoto H. (1998) Generation mechanism of growth stresses in wood cell walls: roles of lignin deposition and cellulose microfibril during cell wall maturation. *Wood Science and Technology* 32 (3): 171-182.

Study on the physical properties and functions of the gelatinous layer in tension wood of *Zelkova serrata* Makino

Yoshiharu ARAKAWA, Kentaro ABE,
Hiroyuki YAMAMOTO, Takashi OKUYAMA
and Takuo SUZUKI

The role of the gelatinous layer on the physical properties peculiar to the tension wood such as a high longitudinal tensile growth stress, a large Young's modulus, and a high shrinkage was investigated. Released strains on the surface of xylem of a 65-years-old Keyaki (*Zelkova serrata* Makino) were measured. Then, longitudinal Young's modulus and longitudinal shrinkage of the wood specimen, which sampled away from nearby each measuring point of the released strain, were determined. And, the ratio of gelatinous fibers and the area percentages of gelatinous layers in the wood fiber domain were counted under the observation using an optical microscope. Then, physical properties of the gelatinous layer were estimated by using the law of mixture. As the result, it was revealed that (1) the longitudinal Young's modulus of the gelatinous layer is 1.46 times larger or more, (2) the released strain is 23.6 times larger, (3) the longitudinal shrinkage is 30.8 times higher than that of the lignified layer. It is concluded that the origin of the physical properties peculiar to the tension wood is attributable to the physical properties of the gelatinous layer.

Keywords: tension wood, gelatinous layer, Young's modulus, growth stress, shrinkage