

木の丈夫さ*
—その形態学的側面—

伊 東 隆 夫**

The Toughness of Wood*
—Its Structural Aspect—

Takao ITOH**

(平成6年7月31日受理)

1. は じ め に

アメリカ合衆国のカリフォルニア州を南北にシエラネバダ山脈が走るが、その麓にヨセミテ公園があり、ここに世界最大の樹木であるセコイアデンドロン (*Sequoiadendron giganteum* Buch.) の森が保存されている。類似の樹木でセコイア (*Sequoia sempervirens* Endl.) があるが前者は別名 Big Tree と呼ばれるのに対して後者は Red Wood と呼ばれている。葉の形も前者はスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) に近いのに比べ、後者はメタセコイア (*Metasequoia glyptostroboides* Hu et Cheng) やラクウショウ (*Taxodium distichum* Rich) に近いことはあまり知られていない。また、セコイアは世界で最も高い木として知られる。しかし、重量はセコイアデンドロンが勝り、最大級のは直径8メートル、高さ100メートルに達すると言われる。したがって、この巨大な樹木が生きながらえるのに高さ100メートルの枝葉の先端まで地中の水分が運ばれなければならない、またそのための水分通道組織が発達し、丈夫に保護されなければならない。ある調査ではその巨大な樹木の地上部の重さは6000トンをはるかに越えるとされる¹⁾。地際部分の組織はこの重さに耐えていることになる。このような木部の組織の強さのひみつはどこにあるのであろうか。この木の丈夫さのひみつを組織レベル、細胞レベルならびに分子レベルで考えてみよう。

2. 木をつくる細胞の並び方

木は生物材料であるので多くの細胞からできていることは容易に想像できる。木でできている製品で最も小さい例は妻楊枝であろう。それでも、その中に含まれる細胞の数は何万にも達する。割り箸ともなれば百万を越えるであろう。一般に、クリ (*Castanea crenata* Sieb. et Zucc.) やケヤキ (*Zelkova serrata* Makino) のような広葉樹はマツ (*Pinus* sp.) やスギのような針葉樹よりも進化していると考えられている

* 第50回木研公開講演 (平成6年5月27日、宇治) において、「木の丈夫なつくり」と題して講演した。

** 細胞構造機能研究室 (Laboratory of Cell Structure and Function)

Key words: Wood structure, Cell wall, Cellulose, Microfibril, Lignin

が、そのためか構成する細胞の種類も多い。例えば、針葉樹は9割以上が同じ種類の細胞（仮道管）からなり、樹木の体を支える機能のほかに、水分を通道する機能ももっている。一方、広葉樹では樹木の

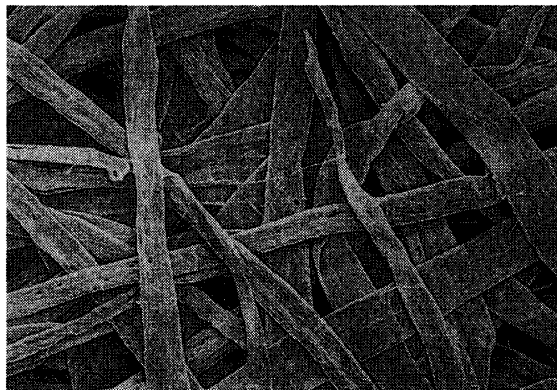


図1 紙の走査電子顕微鏡像。木材繊維が絡んでいる様子がわかる。

体を支える機能は紡錘形の細胞（木繊維）が分担し、水分通道の機能は円筒形の細胞（道管）が分担するというふうに細胞に役割の分担がみられる。いずれにしろこれら仮道管や道管を通して水が地中から高さ30メートルときには100メートルの位置まで運ばれる。これは樹木だけがなせるわざで実に驚くべきしくみと言わざるをえない。水の通路となる道管はときにマイナス数十気圧と著しい減圧状態になるので、これを支える細胞や組織は非常に丈夫なつくりでなければならない。

木部の細胞は非常に長いのが特徴で、細胞同士が十分に重なり合っていて丈夫である。したがって、紙をすいたときにも繊維の絡み具合がよく、それゆえ木は紙の原料として長年用いられている（図1）。また、木部の細胞は中空であるのでこれも軽くて丈夫なつくり都合がよい。前述の軸方向に並ぶ細胞のほかに水平方向、正確には放射方向に並ぶ細胞（放射柔細胞）も多く存在する。図2は針葉樹材の一種のモミ（*Abies firma* Sieb. et Zucc.）の柢目像である。上下方向すなわち幹の主軸方向に並ぶ細胞はすべて仮道管からなり、これに直角方向すなわち水平方向に放射組織が並ぶ。したがって、木では縦横に細胞が織り合わさった構造となっていて、いわば天然の織物ともいえる。このように、組織レベルにおいて木は細胞同士が互いに強く結ばれているつくりになっている。

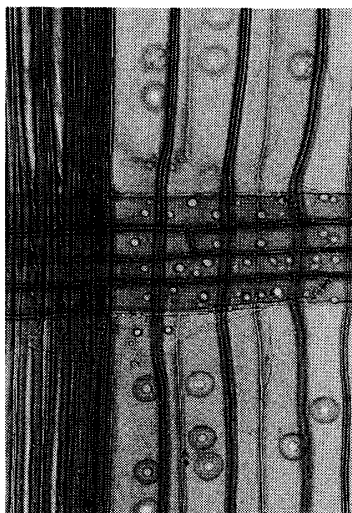


図2 木材は縦と横に並んだ細胞からなる天然の織物。モミの柢目像。400倍。

これに対して、樹木のように地上高く成長するタケはどのようなつくりになっているのであろうか。図3はシマホテイチク (*Phyllostachys aurea* form. *albovariegata* Makino) の一種の横断面を示す。タケの組織をみると基本的に柔細胞と繊維細胞とからなるが、いずれも軸方向にのみ配列し、水平方向に配列する細胞は皆無である。「タケを割ったような性格」という例え話をよく耳にするが、実際に斧や鉋でタケを割るとパリッと見事に縦方向に裂ける。このように、すっきりして気持ちのよい性格を言い表すのに使われるが、これはタケの組織が縦方向に規則的に配列していることによる。

細胞が縦横に織り合わさった木材でも細胞同士があまりにも規則的に絡み合うと割れやすい。例えば、図4はカキノキ (*Diospyros Kaki* Thunb.) の板目像であり、放射組織や木繊維のみならず道管が水平方向に同じ高さで層をなして並んでみられる。これを層階状構造と呼び、カキノキに特徴的にみられる性質である。子供が熟したカキノキの実を見つけてカキノキによじ登り、太い幹から細い枝に身体を移そうとした瞬間にカキノキの枝ごと地面に叩きつけられるということを少年の頃によく耳にした。カキノキは非常に堅い材であるがその反面きわめて脆いところがある。それは、先述のカキノキの層階状構造に見られるように、カキノキの組織が非常に規則的に並んでいることによる。したがって、木材は細胞の

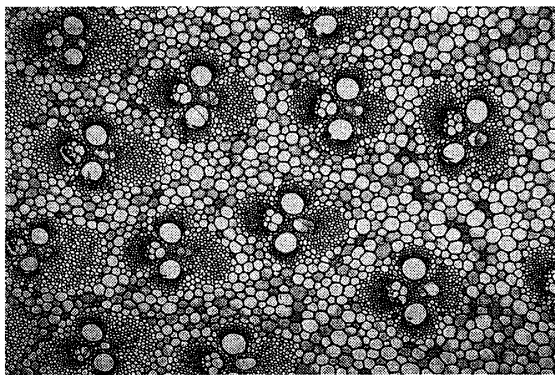


図3 シマホテイチクの横断面像。構成細胞はすべて軸方向に並ぶことを示している。図の左が竹稈の外周部で維管束がより密にならぶ。50倍。

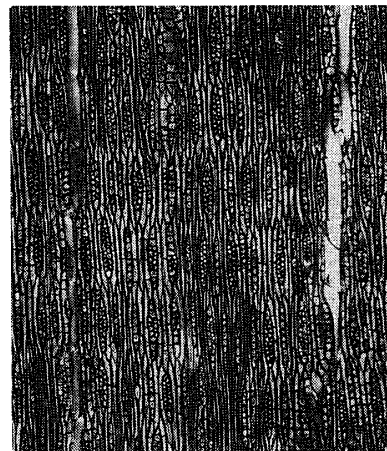


図4 カキノキの放射組織の層階状配列を示す。50倍。

並び方が不規則なほど丈夫であると言える。南洋材の中に軸方向の繊維の走行が反対方向に交錯している種類があり、交錯木理と呼ぶがこのような性質をもつ木材は圧縮に強い。このような性質を持つものに南洋材のラワンやメランチ類が知られるが、国産材ではクスノキ類に軽度のものが認められる。ちなみに、昔わが国ではクスノキ (*Cinnamomum Camphora* Presl.) が白材として使われたことともよく符合する。

3. 樹皮の丈夫さ

木は厚くゴツゴツした樹皮で覆われているのがわかる。老齢の大木ともなれば大きくひび割れし、ときにはコケむしていかにも風雪に耐えた外観を呈する。ワインのコルク栓はコルクガシ (*Quercus suber* L.) という木の皮の一部であり、弾力性があり水分をはじく性質をもっており、150年生以上であれば9年目ごとに4—5 cmのコルク組織が採取できるとされる²⁾。クヌギ (*Quercus acutissima* Carruthers) やアベマキ (*Quercus variabilis* Blume var. *brevipetiolata* Nakai) はわが国ではコルク組織がよく発達した種類として知られる。一般に、針葉樹や広葉樹を問わず、厚みの程度こそ異なるものの大抵樹皮が発達している。このような樹皮は森に棲む動物からの攻撃を防ぎ、微生物や細菌の侵入も容易に受けることはない。一、二年生の若い木にも厚みの程度は劣るが樹皮の覆いがみられる。樹皮をひと皮むけば樹木で最も重

要な生命のいとなみの場である形成層がある。つまり、木の皮は形成層を外界の刺激あるいは外敵から保護している。木の皮は木部に比べると比較にならないほど薄い。これは、形成層という分裂細胞が外に木の皮の細胞を、内に木部となる細胞を生み出すのであるが（図5）、木部に比べて樹皮の細胞の生産率が少ないことと、木部の細胞はいつまでも堆積し続けるが樹皮はいずれは樹木から脱落することによる。樹皮はさらに外樹皮と内樹皮とに分けられ、外側の外樹皮はすべて死んだ細胞からなり乾燥して堅いが、内側の内樹皮は生きている組織を多く含み、かつ柔らかい。この柔らかい組織の一部が針葉

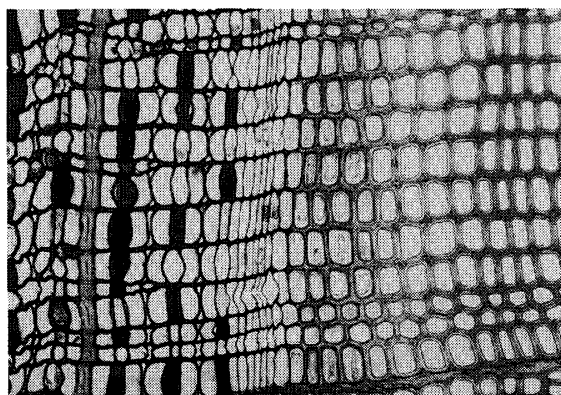


図5 ヒノキの形成層とそれに隣接する木部（図の右半分）および師部（図の左半分）を示す。図の左方向が木の外周部にあたる。200倍。

樹では師細胞、広葉樹では師管と呼ばれる養分の通路となっており、光合成でできたショ糖を樹木の下方に運搬する役割をになっている。その柔らかい師部の組織ならびに分裂能力を有する形成層を保護するために、非常に厚い細胞壁でできた韌皮（じんぴ）繊維と呼ばれる組織が樹皮の内から外まで規則的に並んでいる（図6）。韌皮繊維は非常に強い組織で、コウゾ（*Edgeworthia papyrifera* Sieb. et Zucc.）やミツマタ（*Edgeworthia chrysantha* Lindley）では和紙の原料として使われることで知られる。この組織のおかげで木の皮は外敵の進入を防ぎ、外からの多少の力では簡単にはがれない丈夫なつくりになっている（図7）。この組織は何層にもなり、水平面上の配置は種類ごとに趣向をこらしているのがわかる。これは砦（とりで）を守る守備兵の配置にも匹敵するとも言える。



図6 シナノキの韌皮繊維群が層状に並ぶのがわかる。図の上方向が木の外周部にあたる。250倍。

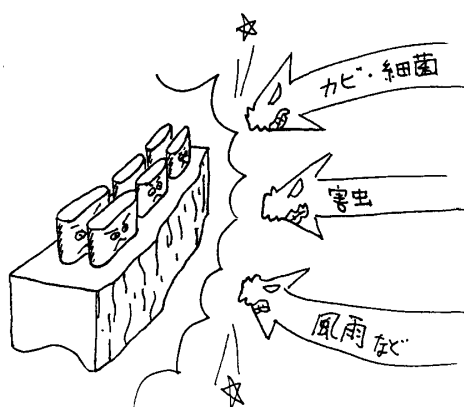


図7 樹皮は微生物等の侵入を防げ、特に韌皮繊維は大きい障壁となることを示す模式図。

4. 木部の丈夫さ

形成層の活動により年々大量の木部細胞が生産される。温帯地域では木部の細胞は春先には直径が大きく壁の薄い細胞が形成されるのに対して、夏以降には直径が小さく、壁の厚い細胞が形成され、やがて成長が止まる。こうして直径の大きい細胞の層に続いて直径は小さいが壁の厚い細胞の層が連続して堆積し、年輪というものの積み重なりができる。直径の等しい細胞が均一にできるよりも前述のように細胞の形や厚みが異なる年輪の層が何重にもとりまくほうが力学的には丈夫である。バウムクーヘンという洋菓子があるが、語源を知らない生徒がこれを見て、「木みたい」といったという。バウムクーヘンの意味するところはバウム (Baum=木)、クーヘン (Küchen=菓子) であって、木に似せて造られた菓子であり、同心円状の黒い筋が木の年輪によく似ている。

木部の中心部分は色が濃く、周辺部分は色が薄い。中心部分は心材 (赤身ともいう) と呼ばれ、周辺部分は辺材 (白太ともいう) と呼ばれる (図8)。心材で色の濃いのは抽出成分である心材物質が多いため、辺材に比べ木材を攻撃する微生物や白ありなどが好まない成分を多く含んでいることが多い。ヒバ (*Thujopsis dolabrata* Sieb. et Zucc. var. *Hondai* Makino) の心材には微生物や白ありにとって非常に毒性

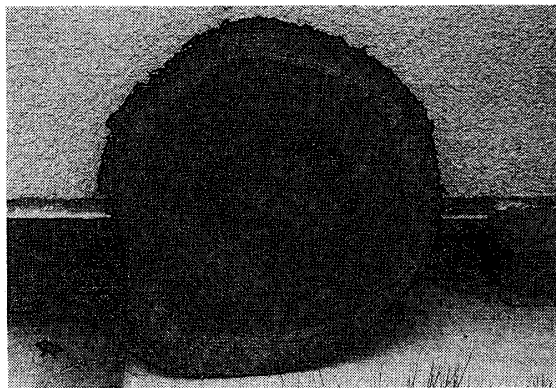


図8 スギ材の横断面。中心の色の濃い部分が心材，周辺の色が薄い部分が辺材を示す。

の強い成分が含まれていることが知られている。一般に、耐朽性の強い木材はフェノール類ないしモノテルペン類などの抗菌性物質を含むとされる³⁾。木はこのように一定の年を経ると、いわば天然の防腐剤を生産して自らを守るようにできているとも言える。しかし、いかなる生物も完璧なものではなく、ときに木の中心部分が朽ち果て、周辺部分が残存してお生きている樹木を、お寺や神社の境内で見かけることがある。

5. 細胞壁の丈夫さ

草はしなやかであるが木はしっかりしている。これは木の細胞が丈夫だからである。言いかえれば、木の細胞は厚い細胞壁からできている。細胞壁は成分的にはセルロースという細い繊維質とヘミセルロースやリグニンという無定形の物質 (マトリックスという) とからできている。細胞同士は細胞間層によってくっついている (図9)。細胞間層にはリグニンが高密度で詰まっており、この高密度のリグニンが強固な接着剤としての役を果たしている。このことは木材が丈夫につくられている根本的な要因の一つである。樹木の細胞の形状をみれば針葉樹では直径が約20—60ミクロンで長さは約1—6ミリメートル、広葉樹では直径が約10—30ミクロンで長さは約1—2ミリメートルである⁴⁾。このように樹木の細胞は針葉樹ならびに広葉樹ともに非常に長細い形をしている。この長細い細胞がその長軸に沿って側面で

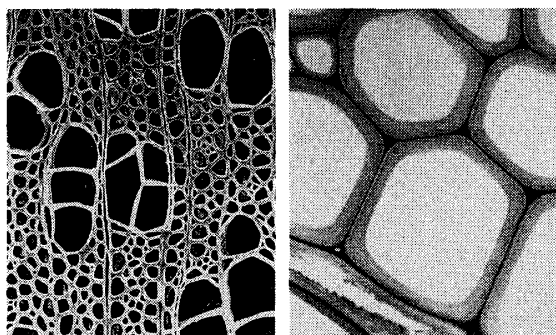


図9 Cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) の木口面の走査電子顕微鏡像（左）ならびに紫外線顕微鏡像（右）を示す¹⁰⁾。

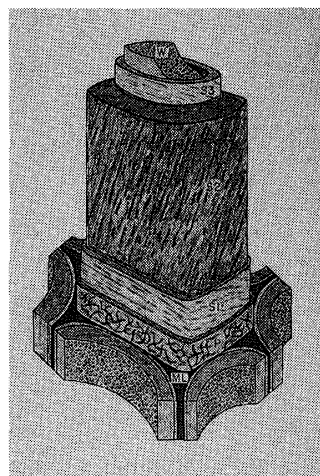


図10 樹木細胞壁の壁層モデル図¹¹⁾。

ML：細胞間層，
P：一次壁，
S1：二次壁外層，
S2：二次壁中層，
S3：二次壁内層，
W：いぼ状層

互いにリグニンによって糊付けされていると言ってもよい。したがって、細胞同士の接着力は相当な強さになる。一方、細胞壁中のセルロースは建物でいえば鉄筋にあたり、ヘミセルロースは鉄筋を結びつける針金で、リグニンはコンクリートにあたる。したがって、鉄筋のセルロースの並ぶ方向は壁の丈夫さにも影響する。木材の細胞壁をよくみると外、中、内の三層からできているのがわかる（図10）。そして、外層と内層ではセルロースは横巻きで中層では縦方向に並ぶ。しかも、中層の占める割合がほとんどである。そういうわけで木材の細胞壁は横、縦、横というふうに丈夫なサンドイッチ構造となり、しかも縦方向の引っ張りに強いつくりになっている。さらに、各層を詳しくみると、ラメラと呼ぶ非常に薄い層が重なっているのがわかる。すなわち、単板にあたるラメラが方向を変えて合わさり、それぞれの層が合板のようなつくりになっているのがわかる（図11）。極めて厚い細胞壁を有する石細胞などでは50枚以上のラメラからなることが知られている⁵⁾。こうしてみると木材の細胞は複合した合板とでもいえる構造となっている。それでいて成分的には鉄筋コンクリートの性質を有しているので二重三重に丈夫であるといえる。いかに、自然の材料が合理的で丈夫なつくりであるかを示す一例である。

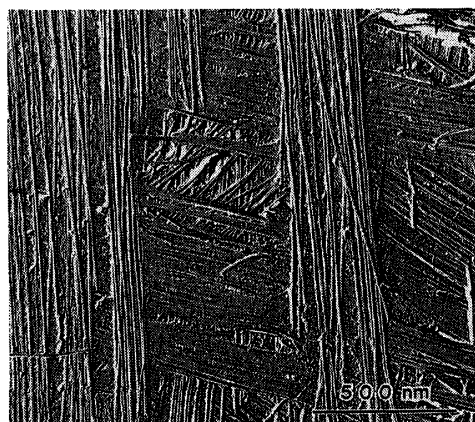


図11 海藻のパロニア (*Valonia macrophysa* Kutz.) 細胞壁のマイクロフィブリルが交差した像。木材細胞壁もこのような天然の合板となる。

6. ミクロフィブリルの丈夫さ

ミクロフィブリルはグルコースが縦に長く連なってできたセルロースの鎖が一定の数だけ束なったものである。束なりかたは生物種によって異なる。木材中のミクロフィブリルは細いほうで、せいぜい30

～40本のセルロースの鎖から構成され、これら個々のセルロースの鎖が分子内あるいは分子間で互いに水素結合によってしっかりと結びあっている。このことは分子のレベルでみて木材が丈夫なつくりになっている根本的な要因の一つとなる。これらマイクロフィブリルを取り囲むようにヘミセルロースやリグニンが存在する。特に、木では鉄筋にあたるセルロースのまわりにリグニンが充填することにより細胞が途方もない圧縮に耐え、高さを増してきたと言える。これは陸上植物が進化するとともにリグニンが生産されるようになったことと一致する⁶⁾。さらにミクロのレベルでみると非セルロース成分はマイクロフィブリルをつなぐ橋渡しの役割をにないマイクロフィブリル構造をいっそう丈夫にしている^{7,8,9)} (図12)。

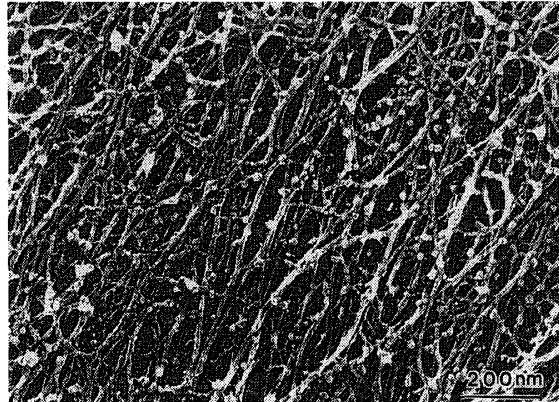


図12 急速凍結した後、 -100°C で低温乾燥させたポプラ培養細胞壁のレプリカの電子顕微鏡像。マイクロフィブリルを横切って架橋構造がみられるほか空隙の多い構造となる。

その一方で、肉眼的にあるいは光学顕微鏡でのぞいて緻密なつくりに見える細胞壁も、この図に示すように -270°C にもなる液体ヘリウムで急速に凍結した試料を極低温で割断ならびにエッチングしてレプリカを得るような最先端の技法を用いて調製した試料を精度の高い電子顕微鏡で拡大してみると隙間の多い構造をしているのがわかる。

7. お わ り に

以上に見てきたように、木材は組織レベルや細胞レベルから分子のレベルに至るまで、すなわちマクロからミクロなレベルまで、細部にわたって繊細でかつ丈夫なつくりになっていることがわかる。このようなつくりのおかげで、樹木は木材というかけ替えのない天然の材料を人類に提供し、特に木の文化の栄えたわが国では古くより巨大木造建造物の用材として絶妙の工法を用いて利用されてきている。その代表的な建物が世界文化遺産となった法隆寺であり、世界最大の木造建造物として知られる東大寺大仏殿であって、その恩恵は計り知れない。

謝 辞

本総説で使用した図1は三菱製紙中央研究所の奥 恭行氏より借用した。また、図7の模式図は息子伊東 学の協力を得た。これらの方々に謝意を表する。

引用文献

- 1) 上原敬二：樹木大図説，有明書房，400 (1959)
- 2) 上原敬二：樹木大図説，有明書房，754 (1959)
- 3) 今村博之，岡本 一，後藤輝男，安江保民，横田徳郎，善本知孝：木材利用の化学，共立出版，151-160 (1983)

伊東：木の丈夫さ

- 4) 島地 謙, 須藤彰司, 原田 浩: 木材の組織, 森北出版, 114, 135 (1976)
- 5) Vian, B. and Roland J.C.: The helicoidal cell wall as a time register, *New Phytol.*, 105, 345-357 (1987)
- 6) Barghoorn, E.S.: Evolution of cambium in geologic time, In, "The formation of wood in forest trees, M.H. Zimmermann, ed., Academic Press, 4 (1964)
- 7) McCann, M.C., Wells, B. and Roberts, K.: Direct visualization of cross-links in the primary plant cell wall, *J. Cell Sci.* 96, 323-334 (1990)
- 8) Itoh, T. and Ogawa, T.: Molecular architecture of the cell wall of poplar cells in suspension culture, as revealed by rapid-freezing and deep-etching techniques, *Plant Cell Physiol.* 34, 1187-1196 (1993)
- 9) 伊東隆夫: 化学と生物, 植物細胞壁の分子構築—急速凍結・ディープエッチング法による立体的観察, *化学と生物*, 31, 724-725 (1993)
- 10) Musha Y.: Distribution of lignin in hardwoods, Doctoral Dissertation in McGill Univ., 110 (1973)
- 11) Core, H.A., Côté, W.A. and Day, A.C.: Wood structure and identification, 33 (1976)