



Title	広葉樹細胞壁における GS-リグニン分布の不均一性
Author(s)	呉, 晋; Wu, Jing
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 18(3), 219-268
Issue Date	1993-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/12151
Type	departmental bulletin paper
File Information	18(3)_p219-268.pdf



広葉樹細胞壁における GS-リグニン分布の不均一性

呉 晋

(北海道大学農学部木材生物学講座)

(平成4年10月6日受理)

Variation in the Distribution of Guaiacyl and Syringyl Lignin in Cell Walls of Hardwoods

Jing Wu

(Laboratory of Structure and Wood Biology,

Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, 060, Japan)

目 次

I. 緒 言	220	IV. 道管配列によるリグニン分布の変動	232
1. 雲南の自然と広葉樹	220	1. 無孔材のリグニン分布	232
2. 研究史	221	1) 供試材	232
1) リグニンの発生と植物の進化	221	2) モイレ呈色反応と VIS スペクトルの結果	232
2) 細胞壁中のリグニン	221	3) UV スペクトルの結果	232
3) 樹木の成長とリグニンの堆積	222	2. 環孔材のリグニン分布	233
3. 本研究の目的	222	1) 供試材	233
II. 供試材と実験	223	2) モイレ反応と VIS スペクトルの結果	233
1. 供試材	223	3) UV スペクトルの結果	234
1) 供試樹種の選定	223	3. 放射孔材のリグニン分布	235
2) 供試材の収集	223	1) 供試材	235
2. 実験方法	223	2) モイレ反応と VIS スペクトルの結果	235
1) 紫外線顕微分光法	223	4. 散孔材のリグニン分布	236
2) リグニンの呈色反応と可視光 (VIS)		1) 供試材	236
スペクトル法	227	2) VIS スペクトルの結果	237
3) クラーソン・リグニンの定量	227	5. 半環孔材のリグニン分布	243
4) アルカリ性ニトロベンゼン酸化	227	1) 供試材	243
3. 実験の妥当性と実験値の取扱い	227	2) VIS スペクトルの結果	243
1. 顕微分光法を用いる理由	227	6. 要 約	244
1) UV スペクトル法	227	1) 道管配列によるリグニンの分布	244
2) リグニンの呈色反応と VIS スペクトル法	228	2) リグニン分布のグループと道管配列	245
2. 実験機器と手法	228	V. 生育地によるリグニン分布の変動	246
1) UMSP-80 顕微分光光度計	228	1. 生育地と供試材	246
2) 測光分析の条件	228	2. 生育地別広葉樹材のリグニン分布の特徴	248
3. モイレ呈色反応の処理時間	230	1) 生育地とリグニン分布	248
4. 実験値の取扱い	230	2) グループ別の各生育地域の樹種占有率	250
1) UV スペクトルと A274 nm/A280 nm 比	230	3. 熱帯材のリグニン分布の特徴	251
2) VIS スペクトルの数値化	231	1) VIS スペクトルの結果	251
3) スペクトルの分類	231	2) UV スペクトルの結果	252
		3) アルカリ抽出前後の UV スペクトル	255
		4) ニトロベンゼン酸化による S/V 比值と	

クラーソン・リグニン含有量	253
5) Aグループ以外のリグニン分布をもつ熱帯材	255
4. 同属樹種の生育地によるリグニン分布の変動	255
5. 要 約	256
1) G-リグニンに富む熱帯材	256
2) 熱帯から冷温帯へのS核比率の変動	256
VI. 細胞形態によるリグニン分布の変動	256
1. 細胞直径と壁厚の測定と分類	256
1) 測定方法	256
2) 道管の直径と壁厚	256
3) 木繊維の直径と壁厚	256
2. 道管の直径とリグニン分布	257
1) リグニン分布の現れかた	257
2) 道管直径とリグニン分布	257
3) 道管直径の差異とGS-リグニンの比率	258
3. 木繊維の直径とリグニン分布	258
1) 木繊維の直径とリグニン分布	258
2) 木繊維直径の差異とGS-リグニンの比率	259
4. 道管及び木繊維の壁厚とGS-リグニンの分布	259
1) 厚壁道管のGS-リグニンの分布	259
2) 厚壁木繊維のリグニンの分布	261
5. 要 約	261
1) 細胞直径の差異とGS-リグニンの比率	261
2) 厚壁の細胞とS-リグニン	261
VII. 総合考察	261
1. 広葉樹リグニン分布の不均一性	261
1) GS-リグニン分布のグループ	261
2) GS-リグニン分布の特徴	262
2. GS-リグニンの不均一性	263
1) 生育地域による成長周期の有無	263
2) 熱帯樹の早生性とリグニンの生合成経路	263
3. 広葉樹リグニン分布の不均一性と樹木進化	264
1) 道管・木繊維の機能分担とリグニン分布	264
2) 気候・環境の変化とリグニン分布	265
謝 辞	265
文 献	265
Summary	268

I. 緒 言

1. 雲南の自然と広葉樹

本研究で使用した供試材は全部中国の雲南省で採集したものである。

雲南省は東経 97°37'~106°12', 北緯 21°9'~29°15' に位置している。面積は 390,000 km² である。雲南高原の北西はヒマラヤにつながり、南東はミャンマ、ラオス、ベトナムと接する。地勢は北西の高山

から南東の低地へと徐々に傾斜している。最高の梅里雪山 (Meli) は海拔 6,740 m に達するが、最低の南の河口県 (Hekou) は海拔 76.4 m である。地形は大体 3 つの部分に分けられる。即ち、北西の高山深谷、中部の高原と南東の丘陵低地である。

気候は雨季 (6~10 月) と乾季 (11~5 月) に分けられるが、山地の海拔の高さの変化によって、温度と水分の変化があり、湿、半湿、半乾燥、乾燥など地域気候が多様である。

雲南の森林は太古のチベット高原の上昇による地形と気候の顕著な変化の影響を受け、また、植物分布では、東アジア植物区域とヒマラヤ植物区域、さらに、汎北極植物区域と古熱帯植物区域が、雲南で会合している。それらの原因で、非常に幅広い植物相をもち、樹種の多様性は最も顕著な特徴である。種子植物だけををとっても、おおよそ 300 科 14,000 種^{1,2)} で、そのうち、木本植物が 170 科 5,000 種、森林の構成樹種は 2,000 樹種に及ぶと言われている³⁾。森林の分布は緯度と海拔との両方に影響される。海拔の高さによると、1,000 m 以下の地区では熱帯樹種が生育し、2,000 m 以上になると、温帯樹種が多く、3,000 m から 4,000 m までは冷温帯の樹種が分布している。1,500~2,500 m の間の広い区域は温帯と熱帯の中間地区で亜熱帯樹種が豊富であ

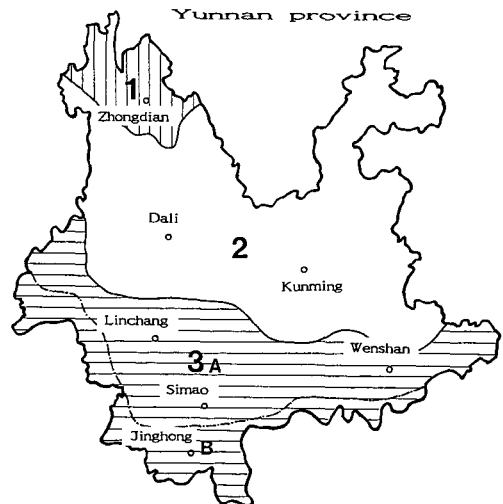


Fig. 1. The floral region of Yunnan province in China.

1. Cold-Temperate floral region.
2. Temperate floral region.
- 3A. Sub-tropical floral region.
- 3B. Tropical floral region.

る (Fig. 1)。本研究では、この冷温帯、温帯、亜熱帯、熱帯の4つの植物生育地域から、主要広葉樹101樹種約200個体を採集して、供試材とした。

2. 研究史

1) リグニンの発生と植物の進化

リグニンは1838年フランスの植物学者 Payen によって発見され、1856年 Schulze により命名された。樹木細胞壁の主要な3つの化学成分はセルロース、ヘミセルロースとリグニンであり、リグニンは約20~30%を占めている⁴⁾。

リグニンの存在は植物の進化と密接に関連している。陸上植物の祖型と言われている緑藻類 (Chlorophycophyta) の細胞壁の主成分はセルロースであるがリグニンがない。石炭紀、二疊紀に繁茂していたシダ (Pteridophyta) は独立する表皮・基本組織及び維管束の3組織系からなり、リグニンは維管束に現れ、セルロースとヘミセルロースからなる細胞壁を固めるコンクリートの役割及び水分の漏れを防ぐ役割をすると考えられている。

白亜紀、三疊紀とジュラ紀を経て、6500万年前~2500万年前の古第三紀に入ったとき、大部分の裸子植物と被子植物が出現したと考えられている⁵⁾。裸子植物では仮道管が水分の通導と樹体の機械的支持作用との役割を兼ねているが、被子植物では水分を通導する道管と機械的支持組織としての木繊維が分化している。

裸子植物、双子葉植物と単子葉植物のリグニンはフェニルプロパン単位 (C_6-C_3) を基本骨格とする点では共通しているが、メトキシ基 (MeO) の含有率が違っている。裸子植物の針葉樹材では主にグアイアシルプロパン構造 (G-リグニンと略す) で、双子葉植物の広葉樹材ではこのG-リグニンのほか、シリングルプロパン構造 (S-リグニンと略す) がある。単子葉植物のイネ科ではこのG・S-リグニンの他に、多くの4-ヒドロキシフェニルプロパン構造 (H-リグニンと略す) からなるリグニンを含む⁴⁾。

2) 細胞壁中のリグニン

既往の研究結果によると、針葉樹では複合細胞間層のリグニン含有率が50~60%と非常に高く、仮道管二次壁で22~23%である。しかし、細胞間層は非常に薄いので、複合細胞間層に存在するリグニン量は全リグニンのうち、早材では28%、晩材では19%を占めるに過ぎず、残りの80%程度は二次壁に存在している。広葉樹でも、全リグニンの

80%前後が二次壁に存在すると考えられている^{6,7,8)}。電子顕微鏡の観察から、球状のリグニン (40~100 nm) が繊維のフィブリルの表面で結合しており、二次壁に存在するリグニンはほぼ均一で、ヘミセルロースと共存しながらセルロースのマイクロフィブリルを囲む形で存在していると考えられている⁹⁾。

Goring らは紫外線顕微鏡を用いて、十数年をかけて木部二次壁におけるリグニンについて定性及び定量的に研究し、リグニン組織化学的研究方法をほぼ確立した。1969~1970年にかけて Fergus と Goring^{10,11,12)} は Birch 材の紫外線吸収スペクトルについて、道管では279 nm、木繊維では270 nm に最大吸収が現れた実験結果をモデル化合物と比較し、広葉樹の道管二次壁では主にG-リグニン、木繊維二次壁では主にS-リグニンからなることをはじめて主張した。

Musha と Goring は^{13,14)} 14樹種広葉樹の紫外線吸収スペクトルと Sarkanen¹⁵⁻¹⁷⁾ による赤外線吸収スペクトル法からの MeO/C₉ の実験結果を比較して、木繊維二次壁リグニンの最大紫外線吸収ピークの位置が MeO/C₉ の比値の増加にしたがって、282 nm から 268 nm へ移動し、道管二次壁の最大吸収は木繊維より高い波長に位置していると報告し、道管では主にG-リグニン、木繊維では主にS-リグニンが分布することを支持し、樹種によって木繊維のG/Sの比率が違うことも示した。

更に、Saka¹⁸⁾ らは非水系システム [nonaqueous system (CHC 13)] でリグニンの選択的なブロム化を行い、ひきつづき TEM-EDXA 分析により各種類の細胞壁に分布するブロムの濃度の測定からリグニンを定量する方法を開発して、木部構成要素の各種類の細胞壁にあるG-リグニンとS-リグニンとの組成比率を求めた。white birch についてG/Sの比は道管二次壁では88:12、木繊維二次壁では12:88、放射柔細胞壁では49:51であると報告した。ブロム化のほか、水銀化したカンパ材の組織別のリグニンのEDXA分析結果も報告されている¹⁹⁻²¹⁾。

蒸煮木材の酵素糖化率と関連して、紫外線顕微分光法を用いて、Fujii ら²²⁾ は *Quercus myrsinaefolia* など9樹種の広葉樹の道管、木繊維と柔細胞の二次壁のリグニン分布を調べた。木繊維二次壁は必ずしもS-リグニンからなるわけではなく、樹種によって違うことを見出した。川村ら^{23,24,25)} は広葉樹のう

ち熱帯広葉樹では温帯の広葉樹とかなり性質の異なったリグニンをもち、針葉樹リグニンと似ていることを報告した。最近、木繊維二次壁は一般の温帯材ではGS-リグニン中のS核の比率が高いが、一部の熱帯材ではG核のほうが高いことが認められた^{26,27)}。

また、ポプラのリグニンにはかなり多量の α -ヒドロキシ安息香酸がエステルとして存在している^{28,29)}。

3) 樹木の成長とリグニンの堆積

樹木の細胞壁がその発達の初期においてはペクチンが細胞間物質として含まれているが、次第にリグニンの沈着が起こり、いわゆる木化することは周知の事実とされている。川村・樋口³⁰⁾は1年生、2年生木部及び心材部分から得られた *Robinia pseudoacacia* のリグニンの性質を調べた。1年生部分のリグニンではそのメトキシ基含有率及びニトロベンゼン酸化全アルデヒド生成率などは広葉樹リグニンの持つ値とは著しく異なり、針葉樹の持つ値に近いという結果を、生長過程におけるリグニンの中のメトキシ基増加の重要な原因の一つとして、リグニン中の、グアイアシル核(G核)及びシリンギル核(S核)の含有比の変化を挙げ、細胞が成熟、または生長するに従ってリグニン含有率及びリグニンの中のメトキシ基含有率が次第に増加すると指摘した。

Fukazawa ら^{31,32)} は画像解析を装着した紫外線顕微鏡を用いて、針葉樹 *Abies sachalinensis* と *Picea glehnii* の一年輪内のリグニン分布を調べ、成熟材においては早材イニシアル部分でリグニン濃度は最大で、その後漸減して、早材晩材境界付近で最小となることを示した。広葉樹についての一年輪内のリグニンの分布は高部、深沢^{33,34)} らによりモイレ呈色反応と紫外線顕微分光法と併用して調べられた。ブナの木繊維について、早材部ではS-リグニンに富むが、少量ながらG-リグニンを含んでいる。晩材部ではほとんどS-リグニンからなり、G-リグニンはあってもごく僅かである。道管については早材部においては多量のG-リグニンが沈着し、S-リグニンはごく僅かであり、晩材に移行するにつれG-リグニンの沈着量は減少し、S-リグニンの沈着量が増えてくると報告した。

寺島・福島らは^{35,36)} 放射性同位元素を用いる標識実験法(RI標識実験法、オートラジオグラフ法)を

使って、*Magnolia kobus* などの細胞壁内の特定の場所におけるリグニンの堆積過程を可視化した。その結論は、H-リグニンは細胞壁形成の早期段階で堆積し、主に複合細胞間層とセルコーナーのリグニンに組み入れられるが、S₂層には堆積しなかった。一方、道管と繊維壁には早期から晩期にわたって広い範囲でG-リグニンが堆積を続けている。S-リグニンは裸子植物と比べて、被子植物に大量に堆積しており、その上、主に細胞壁の堆積の中・晩期段階に堆積するものである。即ち、細胞壁におけるリグニンはその生合成経路と同様に、p-coumaryl, coniferyl そして sinapyl alcohol (H・G・S-units) の順番で形成堆積する。これらの結果により、木部の道管は主にH及びG-リグニンよりなり、木繊維二次壁は主にG-リグニンとS-リグニンより構成されていると報告した。

3. 本研究の目的

筆者は、走査電子顕微鏡(SEM)で雲南産主要広葉樹材の道管の微細構造の研究をした^{37,38)}。本研究では、その続きとして、道管の配列、道管・木繊維の形態及び生育地の異なる49科、91属、101樹種の雲南主要広葉樹材のリグニンの性質を組織化学的に調べ、それらの道管・木繊維の二次壁におけるGS-リグニンの分布を明らかにすることを目的とした。

広葉樹木部要素の道管と木繊維の二次壁でのGS-リグニンにおけるG/Sの構成比率は、多様である。このことは広葉樹リグニン分布の不均一性として表現され、多くの研究がなされているが、木材の組織構造、樹木の生育地とどのように関連しているかはあまり分かっていない。また、細胞壁レベルにおけるリグニン分布の研究は、世界的にも進んでいない。その原因は顕微鏡下でのリグニンの定性もしくは定量分析化学の手法的な限界にあった³⁹⁾。

本研究では、供試材を無孔材、環孔材、半環孔材、放射孔材と散孔材に整理して、広葉樹二次木部の系統形態学的観点から、それらの二次壁におけるGS-リグニンの構成比率の変化を調べた。また、道管形態の変化(直径と壁厚)と対応し、水分の通導に最も適当な形まで進んでいる各段階の道管の二次壁におけるG/Sの比率の変動を調べ、形態の進化につれ、リグニン分布の情報を把握しようとするものである。

生育地を異にすると、樹木生育の活動は異なり、

組織構造まで影響を及ぼしていると考えられる。今回の研究では、冷温帯から熱帯までの広い範囲の、多くの樹種が選ばれた。それらのリグニンの性質の細胞壁レベルの研究は、GS-リグニンの分布と樹木の生活環境との関連の解明には極めて有益なことから考えられる。

また、本研究では、多数の樹種を調査することが必要条件になるので、簡便な呈色反応を応用することにして、その精度を高めるための手法の開発と、その正確を証明しようとした。

II. 供試材と実験

1. 供試材

1) 供試樹種の選定

雲南の森林を構成する樹種は2,000種と言われている。筆者は次の三つのことを基準として、49科91属101樹種を選んだ。①雲南省で重要な用材樹種。②学術的に特別な意味をもつ樹種。③雲南の植物区域を代表する樹種。

供試材は、熱帯材では南の西双版纳の海拔1,000 m以下の低地、亜熱帯材では思茅地区の海拔1,000~1,500 mの山、温帯材では昆明周辺の海拔2,000 m程度の高原、冷温帯材は海拔3,000 m以上の麗江、中甸のヒマラヤとの隣接高山地区から採集した (Fig. 1)。

Table 1. に供試樹種名を示す。101 樹種のうち、冷温帯材は11 樹種、温帯材は24 樹種、亜熱帯材は18 樹種、熱帯材は48 樹種である。管孔の配列によれば、無孔材は1 樹種、散孔材は77 樹種、放射孔材は4 樹種、半環孔材は10 樹種及び環孔材は9 樹種である。同属に2 つ以上の樹種をもつものは10 属である。また、42 樹種の供試材は複数の試料を採集した。

本論文に用いた学名は主として“雲南種子植物名録”¹⁾、“雲南の植物”²⁾及び“西双版纳植物名録”⁴⁰⁾に従った。また、一部の学名は“中国樹木誌”第1巻、第2巻⁴¹⁾と“南洋材”⁴²⁾を参考にした。

2) 供試材の収集

樹高15 m以上、胸高直径約20 cm以上で正常に生育していると考えられる樹木の胸高付近から、樹皮を剥ぎ、約5 cm (繊維方向)×5 cm (接線方向)×3 cm (半径方向)の小ブロックをノミで取り出した。直ちにF. A. A. で固定した。材部の正常な特徴が

示されている成熟材に限定するために、辺材外方部から採集した。

試料を採取すると同時に、供試材の葉、花、果実をさく葉標本として採集した。試料の学名は樹木分類学専門家の中国西南林学院樹木学研究室の何培緒助教授によって同研究室の標本館に保存している標本と比べ鑑定された。滞在時間の制約のために、筆者自身採取することができなかった一部の供試材は西南林学院と雲南熱帯植物研究所の木材研究室に依頼し、同じ方法で小ブロックを採取しF. A. A. に固定してもらい、後日受領した。

選定された樹種のうち、生立木から試料を採取できなかったものは、西南林学院、昆明植物研究所及び雲南省林業科学院の材鑑から収集した。全部の試料のうち、材鑑は20%を占めた³⁷⁾。

2. 実験方法

1) 紫外線顕微分光法

試料：F. A. A. に保存された試料を小片にし、流水で48時間以上洗った。材鑑からの試料も小片にし常法で軟化した。さらに横断面・柃目面・板目面の三断面が見える横断面3~4 mm²のマッチ棒の大きさの試料にした。

抽出：マッチ棒状の試料をエタノール・ベンゼン (1:2) 混液で、6時間冷却管を付し沸騰還流して脱脂した。リグニン以外のポリフェノール類を除去するために、熱帯材試料の一部をさらに1%水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液で沸騰還流して2時間抽出処理した。

包埋：抽出処理された試料を十分に水洗後、アルコールシリーズで脱水し、常法でエポキシ樹脂に包埋した。前報²⁶⁾と同様に、浸透が悪い材はSpurr氏の低粘度樹脂で包埋した。

薄切：LKB-8800とULTRACUT-Jの超ミクロームで、1 μm厚さの木口面切片を作製した。切片は石英製のスライドガラスに載せ、石英製のカバーガラスをかけ、グリセリンで封入した。

紫外線 (UV) 吸収スペクトルの測定：Carl Zeiss社製のUMSP-80 (Fig. 2) の紫外線顕微分光光度計を用いて、280 nm波長で写真を撮ってから、二次壁を対象として測定した。測定条件は次の通りである。測光スポット径：繊維では1.25 μm、道管など薄壁のものでは0.5 μmである。測定波長幅：5 nm。測定波長範囲：250~300 nm。波長走査ステップ幅：1 nm。測定繰り返し回数：3である。測

Table 1. List of species examined

Family/Species	Habitat	Porosity
(1) Magnoliaceae		
<i>Magnolia heptapeta</i> (Buc' hoz.) Dandy	Temp	Dif
<i>Manglietia megaphylla</i> Hu et Cheng	Sub-T	Dif
<i>Michelia alba</i> DC.	Trop	Dif
<i>Paramichelia baillonii</i> (Pierre) Hu	Trop	Dif
<i>Talauma gitingensis</i> Elm.	Trop	Dif
<i>Tsoongiodendron odorum</i> Chun	Trop	Dif
(2) Tetracentraceae		
<i>Tetracentron sinense</i> Oliv.	Temp	V-less
(3) Lauraceae		
<i>Actinodaphne henryi</i> Gamble	Sub-T	Dif
<i>Alseodaphne andersonii</i> (King ex Hook. f.) Kosterm.	Sub-T	Dif
<i>Beilschmiedia linocieroides</i> H. W. Li	Sub-T	Dif
<i>Cinnamomum camphora</i> (Linn.) Presl	Temp	Dif
<i>Machilus yunnanensis</i> Lecomte	Temp	Dif
<i>Phoebe nanmu</i> (Oliv.) Gamble	Temp	Dif
<i>Sassafras tsumu</i> (Hemsl.) Hemsl.	Temp	Ring
(4) Myristicaceae		
<i>Horsfieldia glabra</i> (Bl.) Warbg.	Trop	Dif
<i>Knema furfuracea</i> (Hook. f. et Thoms.) Warbg.	Trop	Dif
(5) Lythraceae		
<i>Lagerstroemia tomentosa</i> Presl	Trop	Dif
(6) Sonneratiaceae		
<i>Duabanga grandiflora</i> (Roxb. ex DC.) Walp.	Trop	Dif
(7) Flacourtiaceae		
<i>Gynocardia odorata</i> R. Br.	Sub-T	Dif
(8) Samydaceae		
<i>Homalium laoticum</i> Gagnep. var. <i>glabratum</i> C. Y. Wu	Trop	Dif
(9) Tetramelaceae		
<i>Tetrameles nudiflora</i> R. Br.	Trop	Dif
(10) Theaceae		
<i>Schima wallichii</i> (DC.) Korth.	Sub-T	Dif
<i>Schima argentea</i> Pritz.	Temp	Dif
(11) Saurauaceae		
<i>Saurauia tristyla</i> DC.	Sub-T	Dif
(12) Dipterocarpaceae		
<i>Dipterocarpus turbinatus</i> Gaertn. f.	Trop	Dif
(13) Combretaceae		
<i>Anogeissus acuminata</i> (Roxb. ex DC.) Guil. et Perr.	Trop	Dif
<i>Terminalia myriocarpa</i> Huerck et M.-A.	Trop	Dif
(14) Tiliaceae		
<i>Tilia chinensis</i> Maxim.	Cold-T	Dif
<i>Tilia panicostata</i> Maxim.	Cold-T	Dif
(15) Sterculiaceae		
<i>Pterospermum lanceaefolium</i> Roxb.	Trop	Dif
(16) Bombacaceae		
<i>Bombax ceiba</i> Linn.	Trop	Dif
(17) Euphorbiaceae		
<i>Baccaurea ramiflora</i> Lour.	Trop	Dif
<i>Bischofia javanica</i> Bl.	Trop	Dif
<i>Cleistanthus sumatranus</i> (Miq.) Muell.-Arg.	Trop	Dif
<i>Macaranga denticulata</i> (Bl.) Muell.-Arg.	Trop	Dif

Family/Species	Habitat	Porosity
(18) Rosaceae		
<i>Malus rockii</i> Rehd.	Cold-T	Dif
<i>Sorbus thibetica</i> (Cardot) Hand.-Mazz.	Cold-T	Dif
(19) Caesalpiniaceae		
<i>Cassia siamea</i> Lam.	Trop	Dif
(20) Mimosaceae		
<i>Acrocarpus fraxinifolius</i> Wight	Trop	Dif
<i>Albizia lucidior</i> (steudel) I. Nielsen	Trop	Dif
(21) Papilionaceae		
<i>Dalbergia fusca</i> Pierre	Trop	Dif
<i>Dalbergia szemaoensis</i> Prain	Sub-T	Dif
<i>Erythrina arborescens</i> Roxb.	Trop	Dif
<i>Erythrina lithosperma</i> Bi. ex Miq.	Trop	Dif
(22) Hamamelidaceae		
<i>Exbucklandia populnea</i> (R. Br.) R. W. Brown	Temp	Dif
<i>Liquidambar formosana</i> Hance	Trop	Dif
(23) Salicaceae		
<i>Populus haoana</i> Cheng et C. Wang	Cold-T	Dif
<i>Populus yunnanensis</i> Dode	Temp	Dif
(24) Betulaceae		
<i>Alnus nepalensis</i> D. Don	Temp	Dif
<i>Betula alnoides</i> Buch.-Ham. ex D. Don	Sub-T	Dif
<i>Betula albo-sinensis</i> Burkil	Cold-T	Dif
(25) Fagaceae		
<i>Castanea mollissima</i> Bl.	Temp	Ring
<i>Castanopsis delavayi</i> Franch.	Temp	Semi-R
<i>Cyclobalanopsis delavayi</i> (Franch.) Schottky	Temp	Rad
<i>Fagus longipetiolata</i> Seem.	Temp	Semi-R.
<i>Lithocarpus dealbatus</i> (Hook. f. et Thoms.) Rehd.	Cold-T	Rad
<i>Quercus acutissima</i> Carr.	Temp	Ring
<i>Quercus aquifolioides</i> Rehd. et Wils.	Cold-T	Rad
<i>Quercus yunnanensis</i> Franch.	Temp	Ring
<i>Trigonobalanus doichangensis</i> (A. Camus) Forman	Sub-T	Rad
(26) Ulmaceae		
<i>Aphananthe cuspidata</i> (Blume) Planch.	Sub-T	Dif
<i>Celtis kummingensis</i> Cheng et Hong	Temp	Ring
<i>Trema orientalis</i> (L.) Blume	Trop	Dif
<i>Ulmus lanceaefolia</i> Roxb. ex Wall.	Trop	Dif
(27) Moraceae		
<i>Morus macroura</i> Miq.	Trop	Semi-R
(28) Carastraceae		
<i>Euonymus yunnanensis</i> Franch.	Temp	Dif
(29) Burseraceae		
<i>Garuga pinnata</i> Roxb.	Trop	Dif
(30) Meliaceae		
<i>Aphanamixis grandifolia</i> Bl.	Trop	Dif
<i>Chukrasia tabularis</i> A. Juss.	Trop	Dif
<i>Melia toosendan</i> Sieb. et Zucc.	Trop	Semi-R
<i>Toona ciliata</i> Roem.	Trop	Semi-R
<i>Toona ciliata</i> var. <i>yunnanensis</i> (C. DC.) C. Y. Wu	Sub-T	Semi-R
(31) Sapindaceae		
<i>Pometia tomentosa</i> (Bl.) Teysm. et Binn.	Trop	Dif
(32) Hippocastanaceae		

Family/Species	Habitat	Porosity
<i>Aesculus wangii</i> Hu ex Fang	Sub-T	Dif
(33) Aceraceae		
<i>Acer forrestii</i> Diels	Cold-T	Dif
(34) Sabiaceae		
<i>Meliosma cuneifolia</i> Franch.	Temp	Dif
(35) Anacardiaceae		
<i>Choerospondias axillaris</i> (Roxb.) Burt et Hill	Trop	Ring
<i>Pistacia chinensis</i> Bunge	Sub-T	Ring
<i>Pistacia weinmannifolia</i> J. Poisson ex Franch.	Trop	Dif
(36) Juglandaceae		
<i>Juglans regia</i> Linn.	Temp	Semi-R
<i>Pterocarya tonkinensis</i> (Franch.) Dode	Trop	Dif
(37) Nyssaceae		
<i>Camptotheca acuminata</i> Decne.	Sub-T	Dif
(38) Araliaceae		
<i>Acanthopanax evodiaefolius</i> Franch.	Cold-T	Ring
(39) Ebenaceae		
<i>Diospyros kaki</i> Thunb.	Temp	Dif
(40) Sapotaceae		
<i>Pouteria grandifolia</i> (Wall.) Pierre	Trop	Dif
(41) Ericaceae		
<i>Rhododendron rubiginosum</i> Franch.	Cold-T	Dif
(42) Styracaceae		
<i>Rehderodendron macrocarpum</i> Hu	Temp	Dif
(43) Oleaceae		
<i>Fraxinus floribunda</i> Wall.	Trop	Semi-R
(44) Apocynaceae		
<i>Alstonia scholaris</i> (Linn.) R. Br.	Trop	Dif
(45) Rubiaceae		
<i>Adina cordifolia</i> Hook. f.	Sub-T	Dif
<i>Anthocephalus chinensis</i> (Lam.) A. Rich. ex Walp.	Trop	Dif
(46) Boraginaceae		
<i>Cordia dichotoma</i> Forst. f.	Sub-T	Dif
<i>Ehretia acuminata</i> R. Br.	Trop	Semi-R
(47) Scrophulariaceae		
<i>Paulownia fortunei</i> (Seem.) Hemsl.	Temp	Semi-R
(48) Bignoniaceae		
<i>Catalpa duclouxii</i> (Dode) Gilmour	Temp	Ring
<i>Markhamia stipulata</i> (Roxb.) Seem.	Trop	Dif
<i>Stereospermum tetragonum</i> (Wall.) DC.	Trop	Dif
(49) Verbenaceae		
<i>Callicarpa arborea</i> Roxb.	Sub-T	Dif
<i>Callicarpa poilanei</i> P. Dop	Trop	Dif
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	Trop	Dif
<i>Vitex quinata</i> (Lour.) Williams var. <i>puberula</i> Moldenke	Trop	Dif

*Total samples of hardwoods examined are 101 species (91 genera, 49 families).

Cold-T	Cold-temperate habitat
Temp	Temperate habitat
Sub-T	Sub-tropical habitat
Trop	Tropical habitat
V-less	Wood vesselless
Dif	Diffuse-porous wood
Ring	Ring-porous wood
Semi-R	Semi-ring-porous wood
Rad	Radial-porous wood (Vessels in radial pattern)

定対象の各部位のそれぞれ 10 ケ所を選び出し、測定したデータを平均値にしてグラフ化した。

2) リグニンの呈色反応と可視光 (VIS) スペクトル法

試料：試料を充分水洗後、滑走式マイクロームで約 10 μm 厚さの木口面切片を作製した。

フロログルシン (Phloroglucin)-塩酸呈色反応 (ウィスナー呈色反応)：0.2% のフロログルシン溶液と 36% の濃塩酸を用意する。10 μm 厚さの木口面切片を無蛍光スライドガラスに載せ、0.2% のフロログルシン溶液を滴下後、36% の濃塩酸を滴下して、カバーガラスをかけ、市販のマニキュアで周囲を封じた後、直ちに VIS スペクトルを測定した。

Mäule 呈色反応 (モイレ呈色反応)：約 10 μm 厚さの木口面切片を過マンガン酸カリウム水溶液で 5 分間処理した。3 回水洗した後、3% 塩酸に 1 分間浸漬し、更に水洗を行い、切片を無蛍光スライドガラスに載せた。濃アンモニア水を一滴切片に滴下してから、直ちにカバーガラスをかけ、市販のマニキュアで周囲を封じた後、直ちに VIS スペクトルを測定した。

VIS スペクトルの測定：呈色反応は両者とも退色が早いので、30 分間以内で繊維と道管の二次壁をそれぞれ 5 ケ所ずつ吸収スペクトルを測定した。測定条件は次の通りである。測光スポット径：繊維と厚い道管壁では 1.25 μm 、薄壁の道管壁では 0.5 μm である。測定波長幅：5 nm。測定波長範囲：400~700 nm。波長走査ステップ幅：5 nm。測定繰り返し回数：3 回。

3) クラーソン・リグニンの定量

洗浄して乾燥した試料は 60~80 メッシュの木粉にした後、アルコール・ベンゼンの混液 (1:2) で抽出処理した。抽出処理後の試料を JIS 法でクラーソン・リグニンの定量をした⁴³⁾。

4) アルカリ性ニトロベンゼン酸化

通常の方法⁴³⁾で分解反応後、反応物に内部標準としてのアセトバニロン (0.3478 g/100 ml) を 3 ml 加えた。さらにエーテルで抽出した後、1 N の HCl で PH 2~3 に調整し、再びエーテルで抽出し、リグニン酸化物を得た。

反応物をガスクロマトグラフィーを用いて分析した。分析条件は次の通りである。カラム：SE-30、カラム温度：180°C、インジェクション温度：250°C、N₂ 流量：20 ml/min、検出器：島津製作所

製水素炎イオン検出器。得られたバニリン (V)、シリングアルデヒド (S) のそれぞれのピーク面積と内部標準のアセトバニロンのピーク面積の比から、S/V 値を求めた。

III. 実験の妥当性と実験値の取扱い

1. 顕微分光法を用いる理由

リグニンは三次元構造を持ち、炭水化物と化学的及び物理的に密接に結合している高分子化合物であり、その形成過程に応じて構造が一様でない。また、その形成過程は不可逆的であるから、植物細胞壁に存在するリグニン (プロトリグニン) をそのまま単離するのはほとんど不可能である⁴⁴⁾。その特異性を持つリグニンの構造を本質的に研究することは非破壊的方法が有利である。

1) UV スペクトル法

リグニンは芳香族化合物であるから、紫外領域の光を吸収する。リグニン溶液の UV 吸収スペクトルは 280 nm 付近に吸収極大があり、これはベンゼノイド吸収帯に基づく吸収である⁴⁵⁾。なお、G 核の吸収は S 核のそれよりも長波長の部位であり、吸収係数も大きい。リグニンモデル化合物の紫外線吸収スペクトルによると、G-リグニンは 280 nm に、S-リグニンは 274 nm に、それぞれ吸収極大がある^{46,47)}。

リグニンの紫外線吸収性質を利用して、Lange⁴⁸⁾ は針葉樹のスプールの二次壁と細胞間層のリグニン量を測定した。Wardrop⁴⁹⁾ は針葉樹仮道管壁の木化過程を観察した。Wergin⁵⁰⁾ は圧縮あて材における特異なリグニン分布を明らかにした。さらに、Goring¹⁰⁻¹²⁾ らは Birch 材を初め、木部構成要素各部におけるリグニン分布の組織化学的定性、定量の手法をほぼ確立した。

Lambert-Beer の法則によって、吸光度はリグニン濃度及び試料の厚さに比例する。針葉樹材の場合、リグニンはほとんど G-リグニンからなるため、厚さが一定な限り吸光度は即濃度を示し、単純でデータの解釈も比較的簡単である。しかし、広葉樹材の場合、G-リグニンと S-リグニンが両方混合しているので複雑となる。特に、280 nm 付近の UV 吸光度について G-リグニンは S-リグニンの約 4 倍である^{13,14)}。したがって、S 核の吸収表現はよく G 核の吸収曲線に覆い隠されてしまうので、単純に UV 吸光度だけで GS-リグニンを定量するのは難し

い。

2) リグニンの呈色反応とVISスペクトル法

リグニンの呈色反応は主にモイレ反応とウィスナー反応である。1900年にMäuleによって開発された反応は、試料を過マンガン酸カリウム、稀塩酸、濃アンモニア水によって順番に処理する。一般に、針葉樹材では黄褐色、広葉樹材では赤紫色を呈する。モイレ反応のメカニズムは、近年、飯塚・中野の研究⁵¹⁻⁵³⁾によって明らかにされ、針葉樹材と広葉樹材リグニンの呈色による相違は、主としてO-キノン構造の着色の相違に起因している。即ち、針葉樹リグニンに生成するO-キノン構造が、縮合型及び非縮合型のいずれのG核に由来する場合においても黄褐色ないし橙色を呈するにすぎないのに対して、広葉樹リグニン中のS核に由来する3-メトキシ-O-キノン構造は赤色ないし赤紫色を呈する。また、Iiyama⁵⁴⁾らはS-リグニンの過マンガン酸カリウム酸化による β -エーテル結合の開裂によって新しく生じた遊離のフェノール性水酸基がモイレ呈色に関与していると唆した。即ち、モイレ呈色反応とそのVISスペクトル法はS-リグニンの検出に有効である。

一方、ウィスナー呈色反応は、1878年Wiesnerによって発見されたもので、この反応のメカニズムはAdler⁵⁵⁾によって解明され、リグニン中に存在するシンナムアルデヒド基に由来することが明らかにされた。Srivastava⁵⁶⁾はモイレ反応とウィスナー反応を利用して、74種の被子植物と22種の裸子植物の樹皮並びに木部のリグニンの性質を研究している。しかし、これは色調の差を顕微鏡によって肉眼的に観察したものである。高部と深沢ら⁵⁷⁾はブナ・ポプラ、ミズナラなどの広葉樹材リグニン各タイプの検出に両反応の顕微分光スペクトル法による解析を試みた。その結果、G-リグニンに富む道管の二次壁においては、モイレ反応によって黄褐色を呈し、400 nm～700 nmにわたるVISスペクトルに吸収極大が認められなかったが、S-リグニンに富む木繊維二次壁においては赤紫色を呈し、510～520 nmの位置に吸収極大が認められた。さらに、リグニンの呈色反応を利用した可視光吸収スペクトルから判断したリグニンの性状とUV吸収スペクトルの吸収極大や吸光度から推定するリグニンの性状がよく一致することを示した。針葉樹リグニンの性質を調べるには紫外線顕微分光法が適してい

る。しかし、広葉樹木部構成要素各部におけるリグニンはその構成が複雑であるので、その性質を調べるには、紫外線吸収スペクトルや各種のリグニン呈色反応の可視光吸収スペクトルの結果を総合して論ずることが重要となる。

2. 実験機器と手法

1) UMSP-80 顕微分光光度計

UMSP-80 顕微分光光度計の本体及びシステムの構成はFig. 2に示されている。紫外線光源はキセノン、可視光光源はハロゲンランプである。分光器は格子モノクロメーターを使って、230～1,050 nmの範囲で最小0.5 nmのステップで、自動的に波長走査ができる。試料ステージは高速で最小ステップ0.25 μm で、X・Y方向に走査される。接眼鏡部と測定用モノクロメーターの間に、光度計アタッチメントがあり、測定する微小領域(最小径0.5 nm)を周辺部と同時に観察することができる。受光部は光軸の真上に設置され、照射光源系と合わせて簡単な短い光路設計となっている。また、モノクロメーター、試料台、光路遮断装置、光度計などはコントロールユニットを経てマイクロコンピュータで完全に制御されている。本研究は、Lambda-scanという波長分析用ソフトを利用して実験を進めた。

2) 測光分析の条件

切片の厚さは吸光度に著しい影響を及ぼす。紫外線顕微分光法に用いる切片の厚さは、針葉樹仮道管で最も適当な厚さは0.5 μm とされているが¹⁰⁻¹²⁾、広葉樹材の場合には、構成成分がGS-リグニンであるため、吸光係数が針葉樹材より低い。従って、0.5 μm 厚さの切片では十分な測定精度を得ることができなかった。0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0 μm の厚さの切片を試したが、2.0～6.0 μm の厚さの切片は吸光度は高すぎた。結果として、本研究では、紫外線顕微分光法に用いる切片の厚さを1.0 μm とした。測定波長幅(バンド幅)は設定された波長とその前後の波長領域も含んでいる。その幅が大きいほど紫外線の照射量が多くなり、小さいほど紫外線の照射量が少なくなる。5 nmのバンド幅がスペクトル曲線の精度及びSN比からみてリグニンの分析に適するものと判定した。

UMSP-80での最小の測光径は、対物レンズ $\times 100$ で0.5 μm 、対物レンズ $\times 32$ で1.5 μm 、対物レンズ $\times 10$ で5 μm である。測定スポット直径の拡大に従って得られる光量は多くなり、SN比は相

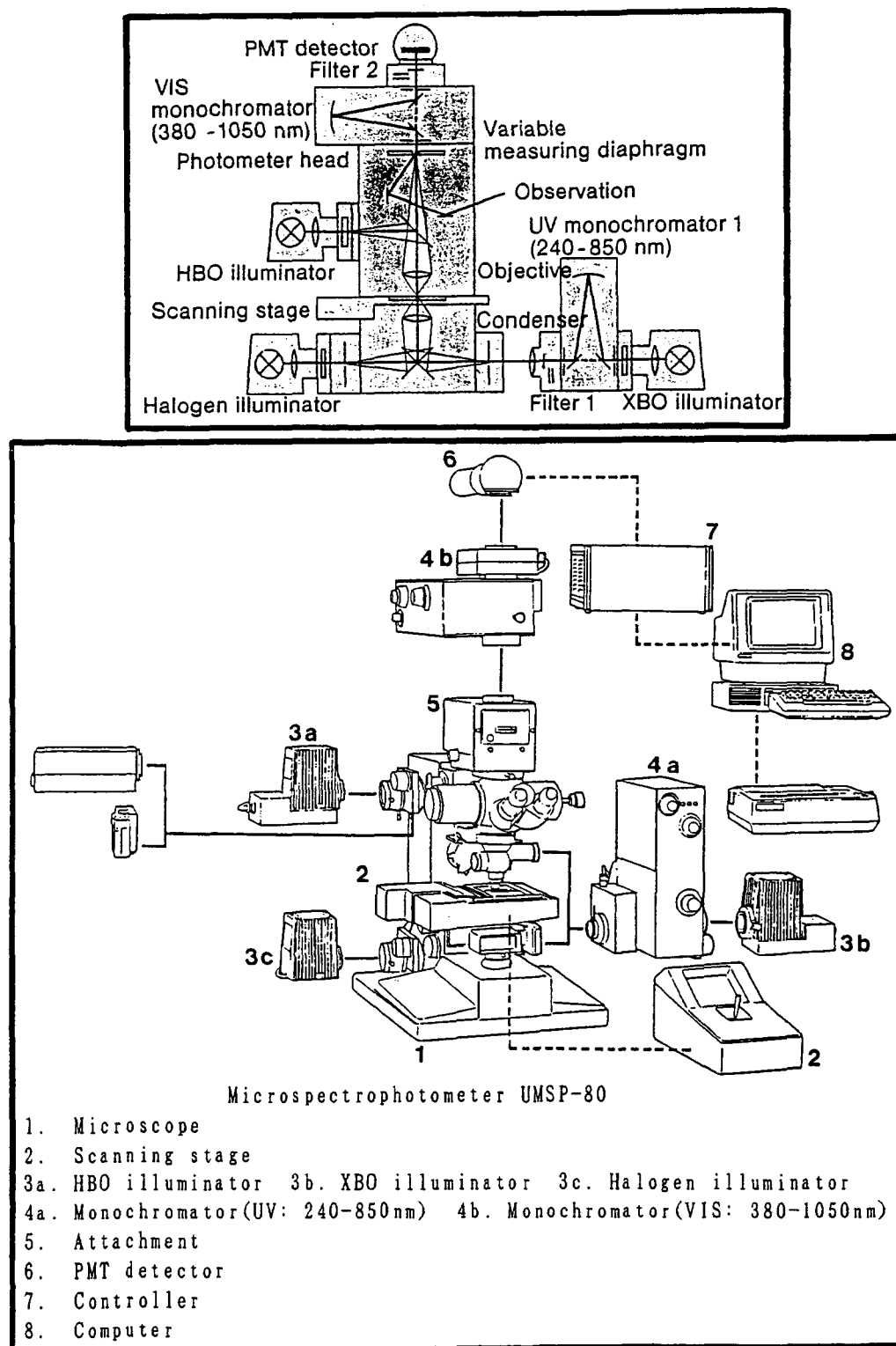


Fig. 2. Microspectrophotometer UMSP-80.

対的に増大する。測定スポットをなるべく二次壁の全幅に広げ、より忠実な結果をとることを考慮した。本研究で用いた供試材では、木繊維では最小直径 $20 \sim 10 \mu\text{m}$ 、最小壁厚約 $3.5 \mu\text{m}$ 、道管では最小壁厚 $1.8 \mu\text{m}$ である。従って厚い木繊維と道管二次壁では測光スポット径を $1.25 \mu\text{m}$ 、薄い道管二次壁では $0.5 \mu\text{m}$ とした。

3. モイレ呈色反応の処理時間

広葉樹木粉のモイレ呈色反応後のスペクトルには $510 \sim 517 \text{ nm}$ に主要吸収帯がある。この吸収帯は稀塩酸 (3%) 処理によって生成するものである。塩酸処理時間の増大によって深色化が起こる。これは二次的に生成した塩素の O-キノンに対する作用に起因すると考えられる⁵²⁾。飯塚⁵²⁾、Takabe ら³⁴⁾ の実験条件を参考して、本研究では処理時間を 0.5 分、1 分、2 分に変えて予備実験を行った。その結果、1 分と 2 分のスペクトルでは 520 nm に吸収極大が現れたが、0.5 分のスペクトルではピークが 510 nm に現れ、短波長側であった (Fig. 3)。その結果、本研究では 1 分の処理時間とした。

モイレ呈色反応後の塩素の逃げによる退色問題がある。これについて、モイレ呈色反応後 10 分から 70 分まで 5 分間ごとに VIS スペクトルをとった。G-リグニンの変化では、トドマツ仮道管二次壁のスペクトルは、時間によって吸光度が少し下がったことを除いて、ほとんど変化はなかった (Fig. 4)。S-リグニンの変化では、温帯産広葉樹 (*Fagus longipetiolata*) の木繊維二次壁リグニンのスペクトルは 10~15 分を経てもほとんど変化はないが、20~30 分後からは吸光度がかなり落ちた。ただし、吸収極大の位置は終始変わらなかった (Fig. 5)。従って、本研究では VIS スペクトルの測定を 30 分以内に終了させることとした。

4. 実験値の取扱い

1) UV スペクトルと $A_{274 \text{ nm}}/A_{280 \text{ nm}}$ 比

リグニンモデル化合物の紫外線吸収スペクトルによって、G-リグニンは 280 nm に、S-リグニンは 274 nm に吸収極大があることが明らかにされている^{46,47)}。 274 nm の位置での吸光度と 280 nm の位置での吸光度との比は、測定対象の二次壁の GS-リグニンのごく大まかな S/G の量比を示唆するものと考えることができる。即ち、 $A_{274 \text{ nm}}/A_{280 \text{ nm}}$ の比値の大きいほうは小さいほうより S-リグニンが多く含まれていると考えることができる。また、

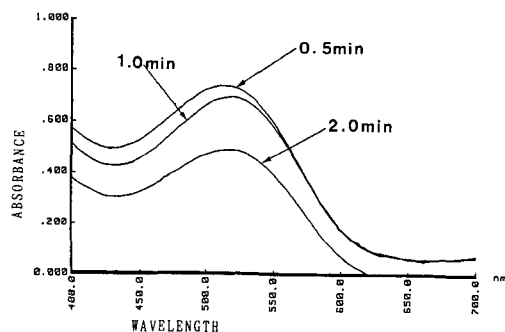


Fig. 3. Mäule VIS-spectra variation effect on the treating time with HCl.

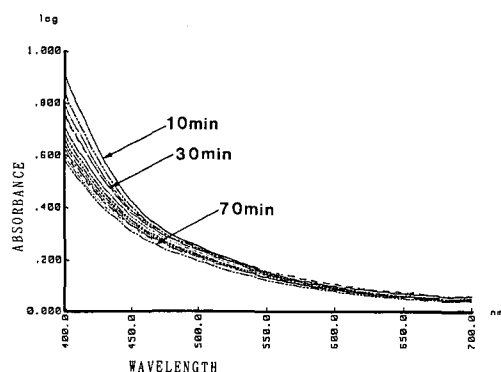


Fig. 4. The variation of the Mäule VIS-spectra after 10 to 70 min. of reaction on the secondary wall of the tracheids.

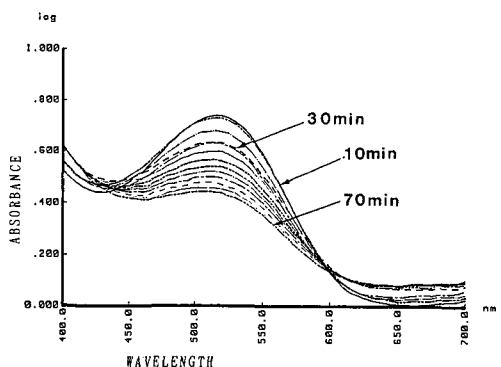


Fig. 5. The variation of the Mäule VIS-spectra after 10 to 70 min. of reaction on the secondary wall of the fibers.

本研究では、この比値が 1 より大きい場合、S/G の比率で S 核が G 核より多いという意味で、S-リグニンに富むと考え、逆に、1 より小さい場合は、S/G の比率で G 核が S 核より多いという意味で、G-リグニンに富むと考えた。

2) VIS スペクトルの数値化

モイレ呈色反応はS-リグニンの検出に有効である。そしてVISスペクトルは520 nm前後に吸収極大が出現する。それで、VISスペクトル吸収曲線で520 nm前後に吸収極大があるものは、S-リグニンに富むと認識した。ごく大まかな目安を立てる基準として、その吸収極大位置にある吸光度とそれより前の吸収スペクトルの極小位置にある吸光度の比 (A_{max}/A_{min}) をS核とG核の量比を表す目安とした。一方、G核に富むリグニンを測定すると、ほぼ滑らかな斜線になって、吸収極大が現れなかった。 A_{max}/A_{min} では表されない。この場合、これに相当するものとして $A_{520\text{ nm}}/A_{420\text{ nm}}$ の比を採用した。

A_{max}/A_{min} の比値が1より大きいことは、モイレ呈色反応のVISスペクトルに吸収極大が現れることであり、S-リグニンに富むと認識した。1より小となるが、針葉樹におけるものと類似していれば、二次壁はほぼG-リグニンが分布していると認識した。また、この数値が1に近づくほどGS-リグニンのS核が少しずつ増加していくものと認識した。

3) スペクトルの分類

本研究では、生長輪が認められる樹種では、そのイニシャル部の付近を早材部として、ターミナル部

の付近を晩材部として測定対象とした。生長輪が認められない樹種では直径が中庸な道管と木繊維の二次壁を測定対象とした。

数値化されたUVスペクトルでは、大まかな基準として、本研究では $A_{274\text{ nm}}/A_{280\text{ nm}} > 1$ はS核がリッチ、 $A_{274\text{ nm}}/A_{280\text{ nm}} < 1$ はG核の比率の増加と認識し、それと同じく、VISスペクトルでは、 $A_{max}/A_{min} > 1$ はS核がリッチ、 $A_{520\text{ nm}}/A_{420\text{ nm}} < 1$ はG核の比率が増加するものとした。

この数値を、早晩材の道管・木繊維二次壁に分け

Table 2. Grouping based on the ratio of VIS-spectra

Group	A_{max}/A_{min} or $A_{520\text{ nm}}/A_{420\text{ nm}}$			
	E. Vessel	L. Vessel	E. Fiber	L. Fiber
A-group	<1	<1	<1	<1
B-group	<1	<1	<1	>1
C-group	<1	<1	>1	>1
D-group	<1	>1	>1	>1
E-group	>1	>1	>1	>1

E. Vessel: Vessel in early wood;

L. Vessel: Vessel in late wood;

E. Fiber: Fiber in early wood;

L. Fiber: Fiber in late wood.

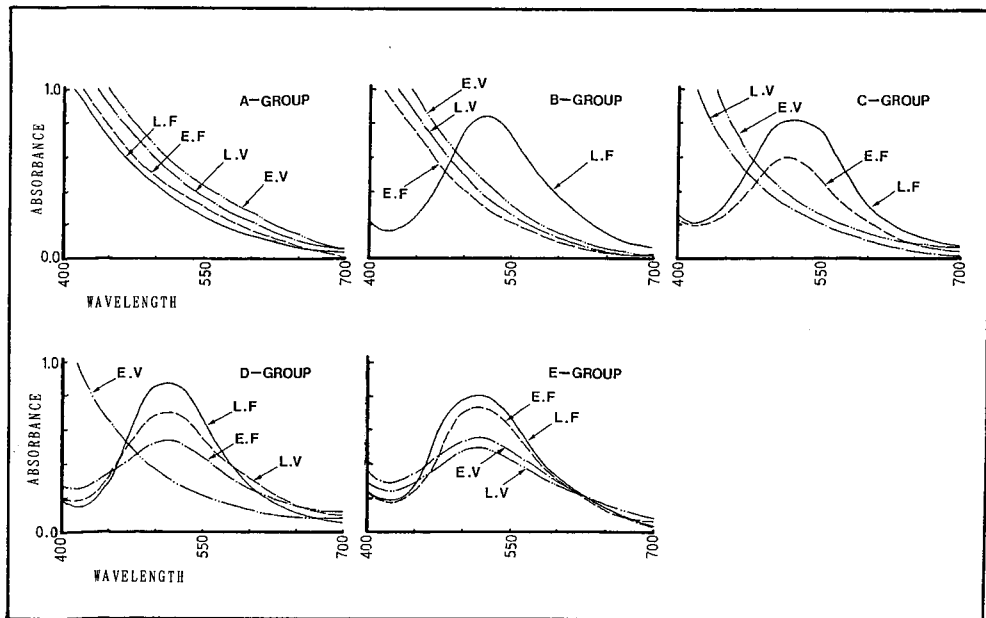


Fig. 6. The 5 VIS-spectra models classified by the difference of GS-lignin distribution

て、各樹種での現れ型を整理すると、Table 2 のように、A, B, C, D, E の5つのグループに分けることが理論上可能である。それに従って、VIS スペクトルの5つのモデルを Fig. 6 に描いた。実験の結果、これらのすべての型が現れたので、本研究ではこの分類にしたがって考察を進めた。

IV. 道管配列によるリグニン分布の変動

針葉樹から広葉樹への進化の過程で、水を通導する道管要素と樹体を支える木繊維は仮道管から機能的及び形態的に分化したとされている。同時に、木部細胞壁のリグニンでも仮道管の G-リグニンから、道管と木繊維の GS-リグニンが出現した。広葉樹材への進化につれ出現した道管は重要な木部要素であり、道管配列は古くから木材学者に注目されている。この道管配列とリグニン分布との関係を明らかにすることが本研究の目的の一つである。

道管配列により、試料を無孔材、散孔材、半環孔材、環孔材、放射孔材に分けて考えた。49 科、91 属、101 樹種の供試材のうち、無孔材は1 樹種（温帯）である。散孔材は77 樹種（冷温帯：8, 温帯：12, 亜熱帯：15, 熱帯：42）である。半環孔材は10 樹種（温帯：4, 亜熱帯：1, 熱帯：5）である。環孔材は9 樹種（冷温帯：1, 温帯：6, 亜熱帯：1, 熱帯：1）である。放射孔材は4 樹種（冷温帯：2, 温帯：1, 亜熱帯：1）である（Table 1）。

1. 無孔材のリグニン分布

1) 供試材

無孔材 *Tetracentron sinense* の試料は雲南の温帯地区で採集した。また、別に中国湖南省産の材鑑も用いた。無孔材の構成細胞は仮道管、軸方向柔細胞及び放射柔細胞である。仮道管は針葉樹とは違う形態を持っている。薄壁の早材仮道管の壁孔は階段状である。早材から晩材への移行域では、階段状から対列状に変化し、晩材のやや厚壁の仮道管の壁孔は単列の有縁壁孔になる。また、この材には短くて横断面では薄壁の道管によく似た連続配列している細胞（以下、特殊な仮道管と記す）がある。

2) モイレ呈色反応と VIS スペクトルの結果

モイレ反応は陰性になった。仮道管の二次壁は早材でも、晩材でも黄褐色を示した。また、特殊な仮道管でも黄褐色であった。可視部のスペクトルを Fig. 7 に示す。上の吸収曲線は晩材仮道管、中間のは早材仮道管、下のは特殊な仮道管の二次壁のスペ

Table 3. The peak position and ratios of absorbance in *Tetracentron sinense* (vessel-less wood)

Samples	UV absorbance		VIS absorbance
	Peak P.	274/281 nm	520/420 nm
<i>U437 (Yunnan)</i>			
E. Tracheid	281 nm	0.961	0.33
L. Tracheid	281 nm	0.955	0.34
V. Tracheid	281 nm	0.941	0.34
<i>H2 (Hunan)</i>			
E. Tracheid			0.35
L. Tracheid			0.36
<i>Conifer (Japan)</i>			
		274/280 nm	
Tracheid	280 nm	0.899	
E. Tracheid			0.34
L. Tracheid			0.35

E.: Early wood; L.: Late wood; V.: Vessel-like tracheid. Peak P.: Peak position in the spectrum.

クトルである。VIS スペクトルからの A 520 nm/A 420 nm の比值は、早材では0.33で、晩材は0.34で、特殊な仮道管は0.34であった。湖南省からの試料の結果も、ほぼ同じスペクトルであった。それらの仮道管の A 520 nm/A 420 nm 比については、早材では0.35、晩材では0.36であった。比較のために、北海道産針葉樹トドマツの VIS スペクトルも測定した。その A 520 nm/A 420 nm の比值は早材仮道管で0.34であり、晩材仮道管で0.35であった（Table 3）。無孔材 *Tetracentron sinense* の A 520 nm/A 420 nm の比值は全部1より小さく、吸収スペクトルはグループ A に分類された。無孔材の GS-リグニンの分布は針葉樹材とはほぼ同じであった。

3) UV スペクトルの結果

無孔材 *Tetracentron sinense* の早材仮道管、晩材仮道管および特殊な仮道管の二次壁の UV 吸収スペクトルはすべて 281 nm に吸収極大が現れた（Fig. 8）。その A 274 nm/A 281 nm 比について、早材仮道管では0.961、晩材仮道管では0.955、特殊な仮道管では0.941であり、全部1より小さかった。

針葉樹のトドマツの UV スペクトルは本研究では測定していないが、Fujii ら²²⁾ によって測定された結果から、アカマツとカラマツの A 273 nm/

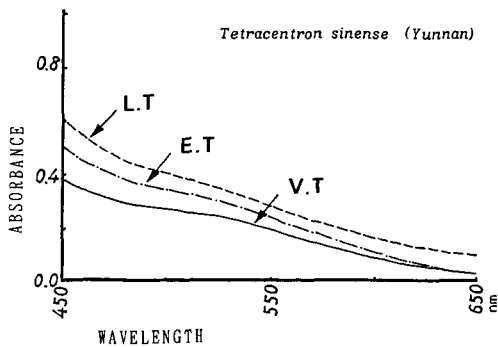


Fig. 7. VIS-spectra of tracheids in the vessel-less wood after staining with Mäule reaction.
* E. T: Tracheid in early wood;
L. T: Tracheid in late wood;
V. T: Vessel tracheid.

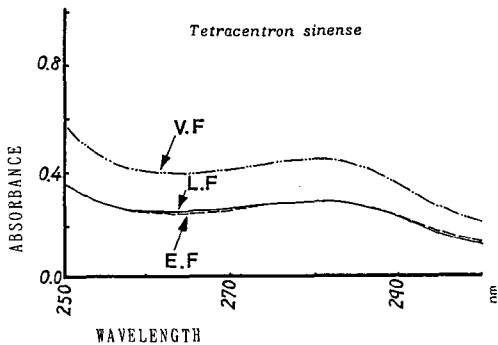


Fig. 8. UV-spectra of tracheids in the vessel-less wood.
* E. T: Tracheid in early wood;
L. T: Tracheid in late wood;
V. T: Vessel tracheid.

A 280 nm の比値は、それぞれ 0.89, 0.93 であり、無孔材の結果はこれに似ている。

Tetracentron sinense の仮道管二次壁におけるリグニンの紫外線吸収のピークポジションとその A 274 nm/A 281 nm の比値は、そこに主に G-リグニンが分布していることを示唆している。無孔材の *Tetracentron sinense* の仮道管は、階段壁孔を持つことにおいて針葉樹仮道管と異なるが、リグニンの性質は針葉樹仮道管と同じように主に G-リグニンで構成されることが考えられる。

2. 環孔材のリグニン分布

1) 供試材

本研究では、広葉樹材の年輪境界の前後でリグニンの性質が異なることを示すために、早材部と晩材部

とを比較した。測定対象の環孔材は 6 科, 8 属, 9 樹種で、そのうち、冷温帯産 1 樹種、温帯産 6 樹種、亜熱帯産 1 樹種、熱帯産 1 樹種であった (Table 1)。環孔材の特徴は孔圈部の径の大きい道管 (以下大径道管と記す) と晩材部の径の小さい道管 (以下小径道管と記す) との道管径の著しい差異である。孔圈部大径道管で薄壁であるのに対して、晩材部小径道管は一般的に壁が厚い。道管の修飾構造について、孔圈部大径道管と晩材部小径道管の違いが多くの環孔材にも認められている⁵⁸⁾。雲南産材では、*Catalpa duclouxii* は孔圈部大径道管壁にらせん肥厚が存在していないが、晩材部年輪境界付近の小径道管にはらせん肥厚が認められた³⁷⁾。

環孔材における道管の発達と樹木の生長とは密接に関連しており、早材部大径道管の発達は春先に、越冬未成熟細胞が急激に分化し、成熟を始める。まず、接線方向に拡大してその最大径に達するが、そのときは道管要素がほとんど伸長生長しない⁵⁹⁾。続いてその二次壁の形成と木化が進み、せん孔が完成して道管として完成する。このように大径道管が速く生長して完成するのは成長期の早期に必要な水分の効率的な運搬に有利と言える。晩材になると、水分の運搬機能は小さくなり、かつ機械的支持作用も樹木にとって重要になると思われ、道管は厚壁で細くなる。早晩材道管の構造の違いは機能の違いとよく対応すると考えられる。

2) モイレ反応と VIS スペクトルの結果

モイレ反応による呈色は道管壁と木繊維壁との違い、孔圈部大径道管と晩材部小径道管との違いを示した。例として、*Quercus acutissima* を挙げて説明する。孔圈部の大径道管壁ではモイレ染色により、黄褐色をしていたが、木繊維壁では赤色を呈した。また、晩材部小径道管壁は木繊維壁と同様に赤紫色を呈した。Fig. 9 の VIS スペクトルでは木繊維の吸収曲線は 520 nm 付近にピークが現れ、A_{max}/A_{min} の比値は早材木繊維は 1.504 で、晩材木繊維はそれと似て、1.660 であった (Table 4)。木繊維二次壁のリグニンは S-リグニンに富むことが示唆された。孔圈部大径道管と晩材部小径道管の吸収曲線には明らかな差異が見られた。孔圈部大径道管では針葉樹の仮道管と似てピークがない滑らかな斜線を示したが、晩材部小径道管では木繊維と似て 520 nm 前後に吸収ピークが認められた。A_{max}/A_{min} の比値を見ると、晩材小径道管二次壁では 1.064 と

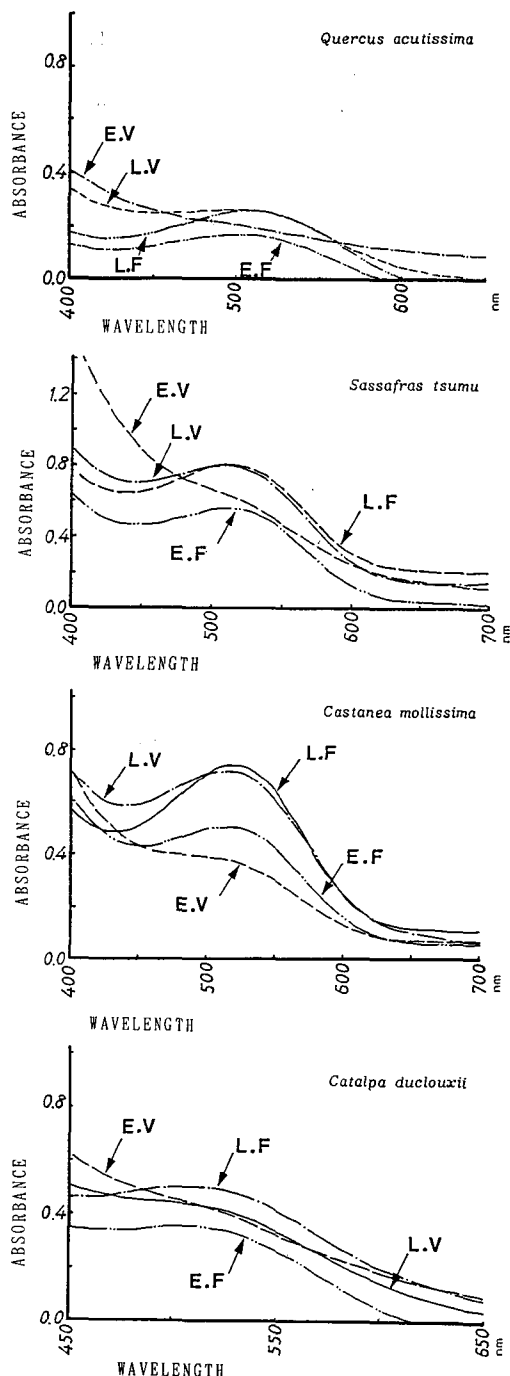


Fig. 9~12. VIS-spectra of vessels and fibers in ring-porous woods after staining with Mäule reaction.

* E. F: Fiber in early wood;
L. F: Fiber in late wood;
E. V: Vessel in early wood;
L. V: Vessel in late wood.

1より大きいが、孔圈部大径道管の比は0.550と1より小さかった。晩材小径道管二次壁におけるリグニンは木繊維と似てS核に富むと考えられる。しかし、木繊維と晩材小径道管の A_{max}/A_{min} 比はそれぞれ1.504, 1.660と1.064であり、全体としてS-リグニンがリッチであるが、数値の差からみて小径道管より木繊維の方がS核がもっと多いことが示唆される。

このような結果は、Dグループに分類され、実験された9樹種の環孔材の全試料から得られた。Fig. 10は *Sassafras tsumu*, Fig. 11は *Castanea mollissima*, Fig. 12は *Catalpa duclouxii* のモイレ呈色反応後のVISスペクトルである。それらの孔圈大径道管二次壁の吸収曲線はなめらかな斜線と僅かな起伏があるものであったが、木繊維二次壁と晩材小径道管二次壁の吸収曲線は520 nm前後に吸収極大が認められた。

Table 4に9樹種の環孔材の早・晩材別の道管二次壁と木繊維二次壁の吸光度比を示した。孔圈部大径道管の比值は平均0.628であり、晩材部小径道管の比值は平均1.123であった。晩材小径道管二次壁のリグニンの性質は孔圈部大径道管二次壁のリグニン分布と明らかに違うことが示唆される。また、樹種別に $A_{520\text{ nm}}/A_{420\text{ nm}}$ 及び A_{max}/A_{min} の比値が違うことにより、道管二次壁でのS/Gの比率が樹種によって違うと考えることができる。早材木繊維の9樹種の平均比値は1.322で、晩材木繊維の平均比値は1.448であった。いずれも1より大きかった。これは木繊維二次壁におけるリグニンの分布はS-リグニンに富み、また、道管でも木繊維でもS-リグニンが早材より晩材のほうに多く含まれていることが分かった。

3) UV スペクトルの結果

9樹種のうち *Quercus acutissima* と *Catalpa duclouxii* の2樹種について、紫外線顕微分光測光を行った。それらのUVスペクトルは早・晩材道管の違いが認められた (Fig. 13, 14)。孔圈部大径道管のUVスペクトルは280 nm前後に顕著な吸収ピークが現れたが、晩材小径道管の吸収ピークは短波長にシフトし、吸光度も低くなった。また、 $A_{274\text{ nm}}/A_{280\text{ nm}}$ の比値は、早材道管では0.919, 晩材道管では1.069であった。これらの結果はVISスペクトルの結果とよく一致し、晩材小径道管二次壁におけるリグニンの性質はS核が量的に多いこ

Table 4. The peak position and ratio of absorbance in the ring-porous woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
<i>Pistacia chinensis</i>	—	0.968	510.0	1.129	510.0	1.485	510.0	1.688
<i>Sassafras tsumu</i>	—	0.488	510.0	1.145	510.0	1.216	510.0	1.247
<i>Castanea mollissima</i>	—	0.664	515.0	1.234	520.0	1.178	520.0	1.541
<i>Quercus acutissima</i>	—	0.550	500.0	1.064	500.0	1.504	510.0	1.660
<i>Quercus yunnanensis</i>	—	0.453	510.0	1.161	510.0	1.403	505.0	1.201
<i>Celtis kunmingensis</i>	—	0.659	510.0	1.089	505.0	1.093	515.0	1.323
<i>Catalpa duclouxii</i>	—	0.649	510.0	1.060	510.0	1.057	505.0	1.116
<i>Acanthopanax evodiaefolius</i>	—	0.535	520.0	1.086	520.0	1.520	520.0	1.376
<i>Choerospondias axillaris</i>	—	0.713	505.0	1.140	515.0	1.438	515.0	1.879
Average :		0.628		1.123		1.322		1.448

※Early W.: Early wood; Late W.: Late wood;

Peak: Peak position; Ratio: Ratio of A520 nm/A420 nm or Amax/Amin in VIS-spectra.

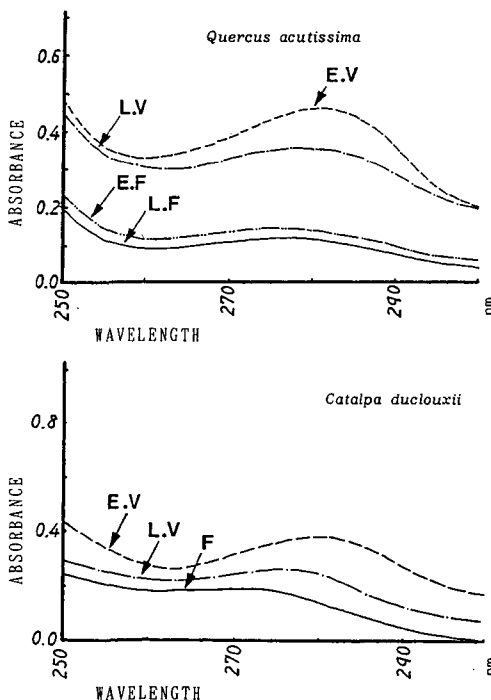


Fig. 13, 14. UV-spectra of vessels and fibers in ring-porous woods.

* E. F: Fiber in early wood;
L. F: Fiber in late wood;
E. V: Vessel in early wood;
L. V: Vessel in late wood.

とを示し、さらに、小径道管二次壁の UV スペクトルの吸光度は木繊維よりかなり高いことは、木繊維

維より多くの G 核が含まれていることを示唆している。このように、道管と木繊維の間の GS-リグニン分布の差異が明瞭にみられた。

3. 放射孔材のリグニン分布

1) 供試材

全部の試料の中で放射孔材は 4 樹種で、全部ブナ科 (Fagaceae) のものであった (Table 1)。そのうち、3 樹種は温帯または冷温帯のもので、1 樹種は亜熱帯のものである。道管はほとんど孤立でほぼ均一な大きさで厚壁で木口面で点々と放射方向へ斜めに配列している。道管の径は年輪のイニシャル部付近から晩材へ向かって小さくなる傾向があるが、その変化は顕著でない。道管壁の厚さも変化は少ない。木繊維では、それらの径及び壁厚には早・晩材の区別は認められない。ターミナル柔細胞などの存在によって生長輪はやや明瞭であるので、本研究の測定した早・晩材の位置は、生長輪の境界の両側である。即ち、イニシャル部の付近を早材として、ターミナル部の付近を晩材とした。

2) モイレ反応と VIS スペクトルの結果

モイレ反応によって呈色された放射孔材の木口面切片では、木繊維の厚い壁は鮮やかな赤色を示し、その VIS スペクトルに顕著なピークが現れた。また、道管壁のモイレ染色では早・晩材とも赤みを持ち、その VIS スペクトルにもピークが出現した。*Quercus aquifolioides* の VIS スペクトル (Fig. 15) をみると、すべての吸収曲線には 520 nm 付近に吸

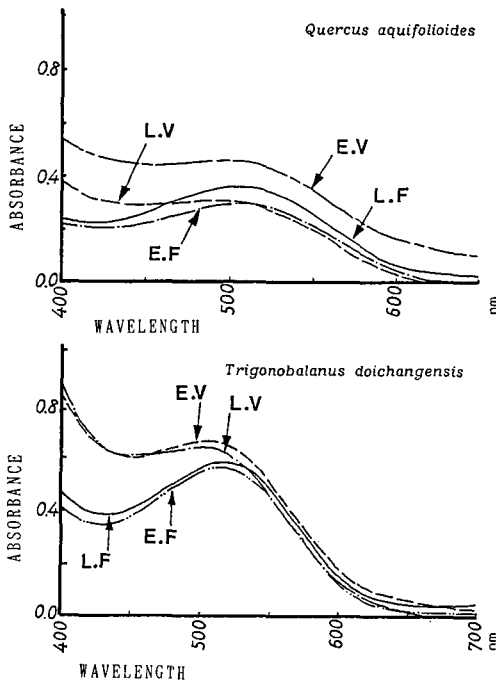


Fig. 15, 16. VIS-spectra of vessels and fibers in radial-porous woods after staining with Mäule reaction.

* E. F: Fiber in early wood;
L. F: Fiber in late wood;
E. V: Vessel in early wood;
L. V: Vessel in late wood.

収のピークが現れている。それらの A_{max}/A_{min} の数値は、早材道管では1.032、晩材道管では1.063、早材木繊維では1.480、晩材木繊維は1.947で、すべての数値は1より大きい。また、道管、木繊維とも早・晩材の差が小さかった。*Trigonobalanus doichangensis* (Fig. 16), *Lithocarpus dealbata*, *Cyclobalanopsis delavayi* の VIS

スペクトルも *Quercus aquifolioides* と同じ特徴を示した。4樹種の A_{max}/A_{min} の数値を Table 5 に示す。早・晩材の道管及び木繊維の全部でその値は1より大きい結果であり、グループ E に分類される。即ち、道管二次壁のリグニンにも S 核は高い比率が示唆される。しかし、それらの吸光度比値は道管二次壁では平均 1.062 であるが、木繊維二次壁では平均 1.560 であった。また、木繊維の吸収極大は 520 nm 前後の樹種が多いが、道管二次壁のピーク位置は木繊維より若干短波長側であった。道管二次壁におけるリグニンは他の樹種に比べて G-リグニンが少ないが、木繊維二次壁のものと比べると、G/S の比率はかなり違うものであることを示している。

なお、放射孔材については紫外線顕微分光測光は行わなかった。

4. 散孔材のリグニン分布

1) 供試材

散孔材は 77 樹種で、全供試樹種の 76% を占めている。そのうち亜熱帯産が 15 樹種、熱帯産が 42 樹種でそれぞれ実験された亜熱帯・熱帯材の 83% と 89% を占めている (Table 1)。

散孔材は一年輪を通じて道管が散在的に分布するもので、道管の径は年輪のターミナル側に向かうにしたがって、漸減的に小さくなる傾向を示すことがある。道管の分布は樹種によっては、孤立の道管が散在していることがあるし、2~3 個の道管が列になること、複数の道管が集団になることもある。また、道管の接線径は樹種によって小さいものから大きいものがあり、壁の厚さや要素の長さなどにも樹種内で差異がある。木繊維の形態も道管と同じく、直径、壁厚、長さなどは様々である。

Table 5. The peak position and ratio of absorbance in the radial-porous woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
<i>Cyclobalanopsis delavayi</i>	500.0	1.031	500.0	1.050	520.0	1.445	520.0	1.490
<i>Lithocarpus dealbatus</i>	510.0	1.067	515.0	1.094	520.0	1.221	525.0	1.416
<i>Trigonobalanus doichangensis</i>	505.0	1.093	500.0	1.060	520.0	1.626	520.0	1.556
<i>Quercus aquifolioides</i>	500.0	1.032	500.0	1.063	505.0	1.480	500.0	1.947
Average:		1.056		1.067		1.443		1.602

※Early W.: Early wood; Late W.: Late wood;
Peak: Peak position; Ratio: Ratio of $A_{520\text{ nm}}/A_{420\text{ nm}}$ in VIS-spectra.

Table 6. VIS absorbance ratio groups of vessels and fibers in diffuse-porous woods

Ratio of Absorbance				Habitat	Total species
E. Vessel	L. Vessel	E. Fiber	L. Fiber		
A-group :					
<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	temperate	1
				sub-tropical	2
				tropical	18(21)
B-group :					
<1.0	<1.0	<1.0	>1.0	sub-tropical	3
				tropical	1(4)
C-group :					
<1.0	<1.0	>1.0	>1.0	cold-temperate	6
				temperate	5
				sub-tropical	6
				tropical	13(30)
D-group :					
<1.0	>1.0	>1.0	>1.0	temperate	1
				sub-tropical	1(2)
E-group :					
>1.0	>1.0	>1.0	>1.0	cold-temperate	2
				temperate	5
				sub-tropical	3
				tropical	10(20)

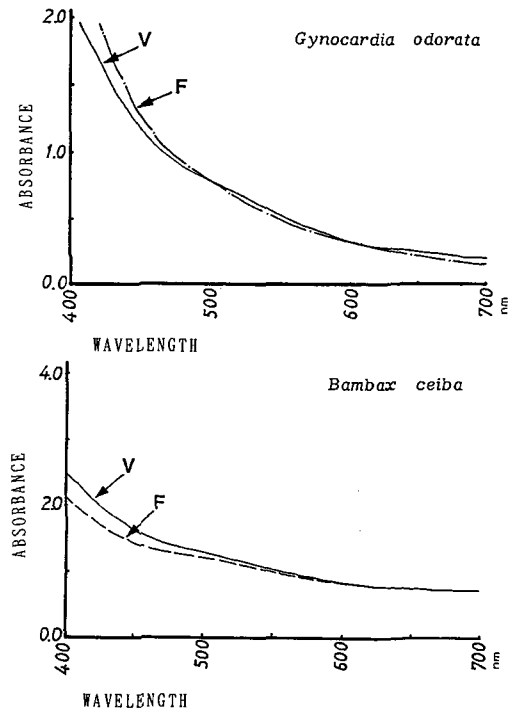
2) VIS スペクトルの結果

77 樹種のモイレ呈色反応とその VIS スペクトルを測定した。その結果はスペクトルの分類の A, B, C, D, E とすべてのグループにわたっていた (Table 6)。

A グループ (全構成要素で G-リグニンに富む) : このグループに分けられたものは 21 樹種で、全散孔材の 27% を占めた。そのうち、温帯産は 1 樹種、亜熱帯産は 2 樹種で、残りの 18 樹種は熱帯産で、A グループのほとんどは熱帯の樹種であった。

さらに、それらの VIS スペクトルの形によって、道管と木繊維二次壁の両方ともがなめらかな斜線のものは A-1 グループ (5 樹種) (Fig. 7) に、やや膨らみがある斜線は A-2 グループ (11 樹種) (Fig. 18) に、道管がなめらかな斜線で、木繊維がショルダーをもつ曲線は A-3 グループ (4 樹種) (Fig. 19) に、その反対は A-4 グループ (1 樹種) (Fig. 20) に分けた。

A グループの VIS スペクトルによる A 520 nm / A 420 nm の比値を早・晩材別に Table 7 に示す (21



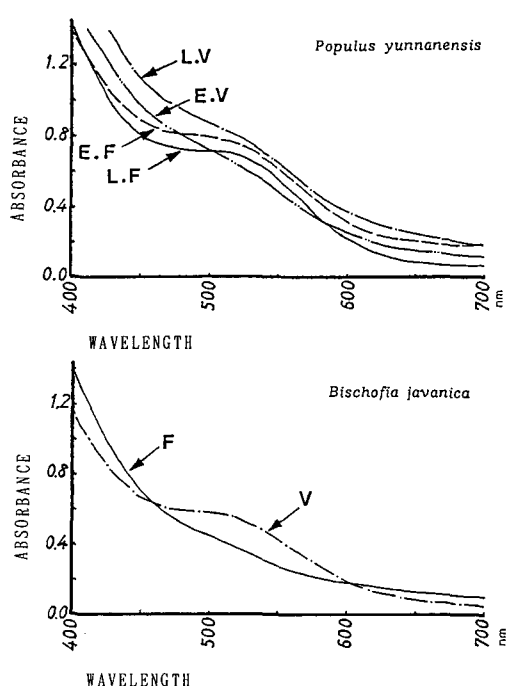


Fig. 17~20. VIS-spectra of A-1, A-2, A-3 and A-4 lignin distribution group in the diffuse-porous woods after staining with Mäule reaction.

* E. F: Fiber in early wood;
L. F: Fiber in late wood;
E. V: Vessel in early wood;
L. V: Vessel in late wood.

樹種のうち、年輪が明瞭或いはやや明瞭のものは6樹種で、早・晩材に分けてVISスペクトルを測定した。年輪が不明瞭な樹種では早晩材の区別ができなかったが、計算の便宜上A 520 nm/A 420 nmの比値を早・晩材の両方に記入した。

道管、木繊維の平均吸光度比はA-1とA-2グループでは道管と木繊維との差はなかった。A 520 nm/A 420 nmの比値は針葉樹材トドマツの0.34に近かった。A-3とA-4グループでは木繊維の吸光度比平均値は道管より高かったが、その差は0.24~0.26で小さかった。また、共通の特徴として、道管でも木繊維でも早・晩材の間に吸光度比平均値の差は0.062でほとんどなかった。吸光度比値が針葉樹材に近いのはGS-リグニンにG核の比率が高く、その早・晩材の差が小さいのはAグループの早・晩材のリグニン分布があまり変わらないと考えられる。

Bグループ：(道管では早晩材ともにG-リグニン

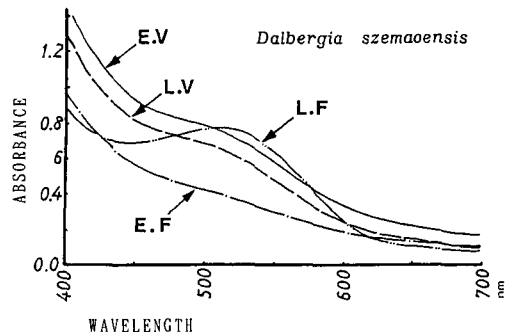


Fig. 21. VIS-spectra of B-lignin distribution group in the diffuse-porous woods after staining with Mäule reaction.

* E. F: Fiber in early wood;
L. F: Fiber in late wood;
E. V: Vessel in early wood;
L. V: Vessel in late wood.

に富むが、本繊維では早材と晩材でリグニン分布が異なる。早材木繊維ではG-リグニンに富むが、晩材木繊維ではS-リグニンが多い。このグループに分けられたものは4樹種で、全散孔材の5%しかなかった。また、亜熱帯産の3樹種と熱帯産の1樹種であった。

それらのA 520 nm/A 420 nm及びAmax/Aminの比値はTable 8に示されている。例として、*Dalbergia szemaensis* (Fig. 21)のVISスペクトルを示す。

Cグループ：Cグループの散孔材は、道管と木繊維のリグニン分布がはっきり違うのが特徴で、道管二次壁におけるリグニンはG核に富む。一方、木繊維はS-リグニンが多い。このグループのものは30樹種に達し、全散孔材の39%を占めた。対象とした20種の冷温帯・温帯産散孔材の55%はCグループのものである。

道管二次壁の吸光度比 (Table 9, 10) をみると、早材では最小0.353 (*Trema orientalis*) から最大0.845 (*Betula alnoides*) まで、晩材では0.353 (*Trema orientalis*) から0.928 (*Knema furfuracea*) まで広い範囲で変動した。また、30樹種のうち、熱帯材の一部を除いて、23樹種の早材道管と晩材道管のA 520 nm/A 420 nm比に差が認められ、その値の差もいろいろであった。

多数のCグループの散孔材のVISスペクトル吸収曲線の形を整理し、Cグループをさらに2つのグループに分けた。即ち、道管二次壁の吸収曲線には、滑らかに下降するもの(C-1)と、吸光度比が1

Table 7. The peak position and ratio of absorbance in the A-group of diffuse-porous woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
group A-1:								
<i>Gmelina arborea</i>	—	0.356	—	0.356	—	0.307	—	0.307
<i>Anthocephalus chinensis</i>	—	0.371	—	0.371	—	0.324	—	0.324
<i>Baccaurea ramiflora</i>	—	0.392	—	0.392	—	0.392	—	0.392
<i>Gynocardia odorata</i>	—	0.394	—	0.394	—	0.336	—	0.336
<i>Callicarpa poilanei</i>	—	0.401	—	0.401	—	0.308	—	0.308
average:		0.383		0.383		0.333		0.333
group A-2:								
<i>Bombax ceiba</i>	—	0.460	—	0.460	—	0.523	—	0.523
<i>Tetrameles nudiflora</i>	—	0.451	—	0.451	—	0.542	—	0.542
<i>Dalbergia fusca</i>	—	0.516	—	0.516	—	0.588	—	0.588
<i>Duabanga grandiflora</i>	—	0.556	—	0.556	—	0.431	—	0.431
<i>Lagerstroemia tomentosa</i>	—	0.563	—	0.544	—	0.590	—	0.487
<i>Homalium laoticum</i>	—	0.598	—	0.598	—	0.604	—	0.604
<i>Alstonia scholaris</i>	—	0.617	—	0.617	—	0.615	—	0.615
<i>Cleistanthus sumatranus</i>	—	0.657	—	0.587	—	0.537	—	0.560
<i>Vitex quinata</i>	—	0.697	—	0.767	—	0.699	—	0.838
<i>Callicarpa arborea</i>	—	0.716	—	0.699	—	0.684	—	0.634
<i>Horsfieldia tetratropata</i>	—	0.785	—	0.785	—	0.795	—	0.777
average:		0.601		0.598		0.601		0.599
group A-3:								
<i>Erythrina lithosperma</i>	—	0.383	—	0.383	—	0.734	—	0.734
<i>Erythrina arborescens</i>	—	0.576	—	0.576	—	0.753	—	0.753
<i>Populus yunnanensis</i>	—	0.510	—	0.525	—	0.931	—	0.904
<i>Pterocarya tonkinensis</i>	—	0.658	—	0.654	—	0.779	—	0.814
average:		0.532		0.535		0.799		0.801
group A-4								
<i>Bischofia javanica</i>	—	0.603	—	0.603	—	0.361	—	0.361
average:		0.603		0.603		0.361		0.361

※Early W.: Early wood; Late W.: Late wood;

Peak: Peak position; Ratio: Ratio of A520 nm/A420 nm in VIS-spectra.

より小さく、ショルダーを持つ吸収曲線(C-2)である。

C-1 グループの散孔材は14 樹種であった (Table 9)。代表的なものとして、*Acer forrestii*, (Fig. 22), *Betula albo-sinensis* (Fig. 23) の2 樹種のスペクトル図を示した。それらの VIS スペクトルの形、ピーク位置及び比值から、C-1 グループに分けられた散孔材は、道管では針葉樹の吸収曲線と似て、G-リグニンに富むとみなされるが、木繊維二

次壁ではS-リグニンに富むと認識される。また、道管でも、木繊維でも早材より晩材のほうで吸光度比值が高くなったので、GS-リグニンの分布中、晩材のほうがS核の比率はもっと高いと考えられる。

C-2 グループの散孔材は16 樹種であった (Table 10)。それらの代表的なものとして、*Cinnamomum camphora* (Fig. 24), *Exbucklandia populnea* (Fig. 25) の2 樹種の VIS スペクトルを示した。そ

Table 8. The peak position and ratio of absorbance in the B-group of diffuse-porous woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
<i>Actinodaphne henryi</i>	—	0.485	—	0.509	—	0.787	510.0	1.094
<i>Macaranga denticulata</i>	—	0.469	—	0.714	—	0.795	515.0	1.152
<i>Dalbergia szemaoensis</i>	—	0.613	—	0.602	—	0.489	505.0	1.142
<i>Aphananthe cuspidata</i>	—	0.694	—	0.759	—	0.776	515.0	1.145
average :		0.565		0.646		0.712		1.133

※Early W. : Early wood ; Late W. : Late wood ;
Peak : Peak position ; Ratio : Ratio of Amax / Amin or A520 nm / A420 nm.

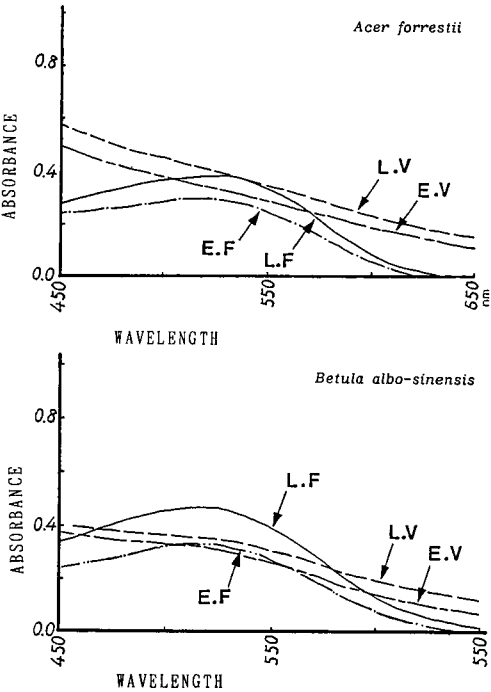


Fig. 22, 23. VIS-spectra of C-1 lignin distribution group in the diffuse-porous woods after staining with Mäule reaction.
* E. F : Fiber in early wood ;
L. F : Fiber in late wood ;
E. V : Vessel in early wood ;
L. V : Vessel in late wood.

これらの道管二次壁の VIS スペクトルからの吸光度比値を調べ、早材では最小 0.618, 最大 0.861, 平均値は 0.749 であり、晩材では最小 0.692, 最大 0.928, 平均値は 0.771 であった。この比は、早・晩材ともに C-1 グループより上回っており、道管二次壁のリグニンは C-1 グループより S 核に富むと

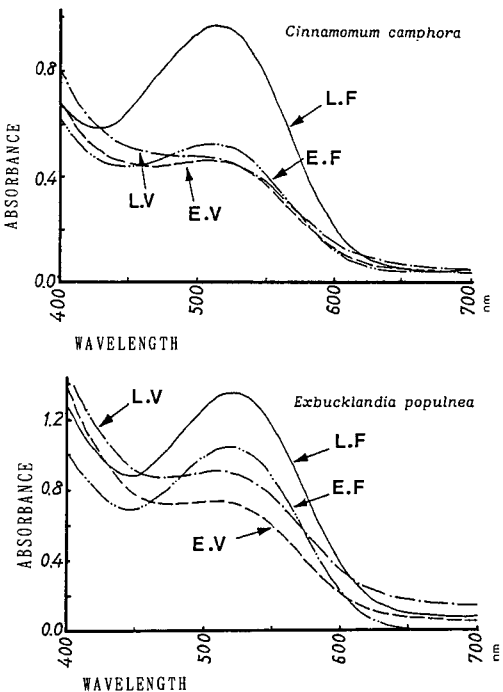


Fig. 24, 25. VIS-spectra of C-2 lignin distribution group in the diffuse-porous woods after staining with Mäule reaction.
* E. F : Fiber in early wood ;
L. F : Fiber in late wood ;
E. V : Vessel in early wood ;
L. V : Vessel in late wood.

考えられる。
D グループ : (早材道管二次壁のリグニンに G 核が多く含まれているが、他の構成要素はすべて S-リグニンに富む)。この様なリグニン分布のものは散孔材で非常に少なく、*Machilus yunnanensis* (Fig. 26) と *Aesculus wangii* の 2 樹種しかない。

Table 9. The peak position and ratio of absorbance in the C-1 group of diffuse-porous woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
C-1(total 14 species) :								
<i>Acer forrestii</i>	—	0.691	—	0.703	515.0	1.252	520.0	1.328
<i>Alseodaphne andersonii</i>	—	0.670	—	0.599	515.0	1.673	515.0	1.490
<i>Betula albo-sinensis</i>	—	0.835	—	0.869	515.0	1.385	520.0	1.414
<i>Cordia dichotoma</i>	—	0.556	—	0.458	515.0	1.101	510.0	1.097
<i>Manglietia megaphylla</i>	—	0.542	—	0.649	510.0	1.037	510.0	1.030
<i>Meliosma cuneifolia</i>	—	0.478	—	0.537	505.0	1.268	515.0	1.476
<i>Populus haoana</i>	—	0.402	—	0.402	505.0	1.033	505.0	1.043
<i>Rhododendron rubiginosum</i>	—	0.447	—	0.453	515.0	1.084	505.0	1.105
<i>Rehderodendron macrocarpum</i>	—	0.529	—	0.508	500.0	1.043	500.0	1.032
<i>Saurauia tristyla</i>	—	0.565	—	0.605	520.0	1.376	520.0	1.333
<i>Schima argentea</i>	—	0.720	—	0.732	510.0	1.132	510.0	1.378
<i>Schima wallichii</i>	—	0.763	—	0.847	510.0	1.283	515.0	1.354
<i>Terminalia myriocarpa</i>	—	0.756	—	0.757	505.0	1.260	510.0	1.275
<i>Trema orientalis</i>	—	0.353	—	0.353	510.0	1.106	510.0	1.106
average :		0.593		0.609		1.136		1.247

*Early W. : Early wood ; Late W. : Late wood ;

Peak : Peak position ; Ratio : Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm.

Table 10. The peak position and ratio of absorbance in the C-2 group of diffuse-porous woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
C-2(total 16 species) :								
<i>Albizia lucidior</i>	—	0.618	—	0.729	510.0	1.249	515.0	1.155
<i>Anogeissus acuminata</i>	—	0.789	—	0.789	505.0	1.304	505.0	1.304
<i>Aphanamixis grandifolia</i>	—	0.796	—	0.796	510.0	1.229	510.0	1.229
<i>Betula alnoides</i>	—	0.845	—	0.859	515.0	1.556	515.0	1.839
<i>Cassia siamea</i>	—	0.730	—	0.730	510.0	1.277	510.0	1.277
<i>Cinnamomum camphora</i>	—	0.827	—	0.727	510.0	1.199	515.0	1.648
<i>Dipterocarpus turbinatus</i>	—	0.711	—	0.711	520.0	1.715	520.0	1.715
<i>Exbucklandia populnea</i>	—	0.705	—	0.765	520.0	1.534	520.0	1.529
<i>Garuga pinnata</i>	—	0.857	—	0.857	520.0	1.498	520.0	1.498
<i>Knema furfuracea</i>	—	0.861	—	0.928	520.0	1.345	515.0	1.322
<i>Pometia tomentosa</i>	—	0.814	—	0.808	520.0	1.375	515.0	1.376
<i>Pterospermum lanceaefolium</i>	—	0.712	—	0.712	520.0	1.634	520.0	1.634
<i>Stereospermum personatum</i>	—	0.753	—	0.753	520.0	1.573	520.0	1.573
<i>Tilia chinensis</i>	—	0.620	—	0.712	510.0	1.124	510.0	1.132
<i>Tilia paucicostata</i>	—	0.569	—	0.692	510.0	1.111	510.0	1.126
<i>Ulmus lanceaefolia</i>	—	0.773	—	0.773	510.0	1.128	510.0	1.128
average :		0.749		0.771		1.365		1.405

*Early W. : Early wood ; Late W. : Late wood ;

Peak : Peak position ; Ratio : Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm.

Table 11. The peak position and ratio of absorbance in the D-group of diffuse-porous woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
<i>Machilus yunnanensis</i>	—	0.821	510.0	1.189	510.0	1.567	515.0	1.763
<i>Aesculus wangii</i>	—	0.776	500.0	1.060	515.0	1.144	515.0	1.477
average:		0.798		1.124		1.356		1.620

※Early W.: Early wood; Late W.: Late wood;
Peak: Peak position; Ratio: Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm.

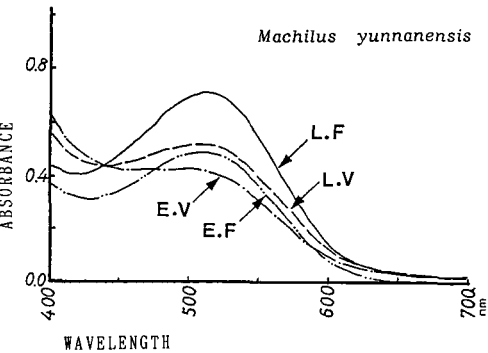


Fig. 26. VIS-spectra of D-lignin distribution group in the diffuse-porous woods after staining with Mäule reaction.
* E. F: Fiber in early wood;
L. F: Fiber in late wood;
E. V: Vessel in early wood;
L. V: Vessel in late wood.

それらの VIS スペクトルは環孔材と似て、道管二次壁の吸収曲線は、早材では下降線ながら若干膨らみがあり、晩材では吸収ピークが現れた。木繊維二次壁の吸収曲線は早・晩材ともにピークが顕著に現れた (Table 11)。

道管の径を調べると、*Machilus yunnanensis* の早材道管の平均接線径は 124 μm であるが、晩材道管では 55 μm であった。散孔材であるが、半環孔材と似て、早晩材による差は大きかった。

E グループ：(道管と木繊維の二次壁が早・晩材の両方で S-リグニンに富む)。E グループに分けられた散孔材は 19 樹種で、全散孔材数の 25% を占めた。生育地別に見ると、冷温帯産 2 樹種、温帯産 5 樹種、亜熱帯産 3 樹種、熱帯産 10 樹種であった。どの生育地でも、E グループの樹種が存在している。

それらの代表として、*Michelia alba* (Fig. 27),

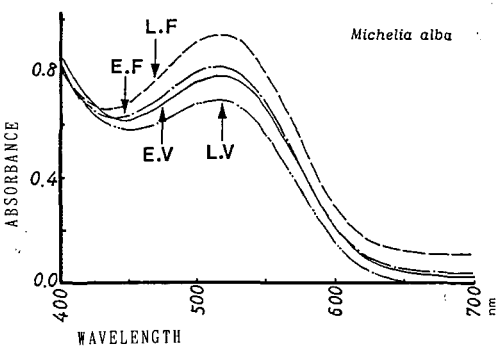


Fig. 27, 28. VIS-spectra of E-lignin distribution group in the diffuse-porous woods after staining with Mäule reaction.
* E. F: Fiber in early wood;
L. F: Fiber in late wood;
E. V: Vessel in early wood;
L. V: Vessel in late wood.

Camptotheca acuminata (Fig. 28) の 2 樹種の VIS スペクトルを示した。吸光度比を Table 12 に整理した。早材道管では最小 1.032, 最大 1.430, 平均値は 1.149 であり、晩材道管では最小 1.045, 最大 1.379, その平均値は 1.171 であった。木繊維二次壁の早材では最小 1.061, 最大 1.828, 平均値は 1.513 であり、晩材では最小 1.238, 最大 1.925,

Table 12. The peak position and ratio of absorbance in the E-group of diffuse-porous woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
<i>Talauma gitingensis</i>	515.0	1.032	510.0	1.045	515.0	1.061	520.0	1.341
<i>Tsoongiodendron odorum</i>	505.0	1.041	510.0	1.199	510.0	1.059	510.0	1.056
<i>Euonymus yunnanensis</i>	510.0	1.046	505.0	1.181	520.0	1.472	520.0	1.424
<i>Alnus nepalensis</i>	505.0	1.051	510.0	1.105	515.0	1.318	520.0	1.433
<i>Michelia alba</i>	505.0	1.056	505.0	1.035	515.0	1.494	520.0	1.582
<i>Paramichelia baillonii</i>	510.0	1.063	510.0	1.168	520.0	1.314	520.0	1.548
<i>Chukrasia tabularis</i>	505.0	1.063	505.0	1.155	515.0	1.666	515.0	1.670
<i>Camptotheca acuminata</i>	505.0	1.074	510.0	1.127	510.0	1.177	515.0	1.238
<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	500.0	1.087	500.0	1.078	510.0	1.374	515.0	1.676
<i>Beilschmiedia Linocieroides</i>	500.0	1.092	505.0	1.075	515.0	1.648	520.0	1.724
<i>Markhamia stipulata</i>	510.0	1.098	510.0	1.122	515.0	1.840	515.0	1.617
<i>Malus rockii</i>	510.0	1.112	505.0	1.232	510.0	1.423	510.0	1.413
<i>Pouteria grandifolia</i>	510.0	1.166	515.0	1.251	520.0	1.330	520.0	1.447
<i>Phoebe nanmu</i>	510.0	1.173	510.0	1.209	510.0	1.439	510.0	1.622
<i>Magnolia heptapeta</i>	510.0	1.189	510.0	1.116	520.0	1.634	515.0	1.482
<i>Sorbus thibetica</i>	510.0	1.212	500.0	1.279	510.0	1.883	515.0	1.883
<i>Adina cordifolia</i>	510.0	1.222	510.0	1.222	525.0	1.651	525.0	1.651
<i>Pistacia weinmannifolia</i>	510.0	1.309	510.0	1.379	510.0	1.796	515.0	1.793
<i>Liquidambar formosana</i>	515.0	1.360	515.0	1.229	515.0	1.391	520.0	1.925
<i>Diosphyros kaki</i>	510.0	1.430	510.0	1.249	515.0	1.828	515.0	1.582
average:		1.149		1.171		1.513		1.582

※Early W.: Early wood; Late W.: Late wood;

Peak: Peak position; Ratio: Ratio of Amax/Amin.

平均値は 1.582 であった。吸光度比の値はいずれも 1 より大きい、それらの早・晩材の平均比値を見ると、若干例外があるが、一般に早材より晩材の比値が大きかった。また、道管より木繊維の比値は大きかった。E グループの散孔材は道管と木繊維の二次壁ともに S-リグニンに富むと言えるが、一年輪内では早材と晩材の差がわずかに認められた。木繊維二次壁のリグニンは道管より S 核を多く含むことがうかがえた。

5. 半環孔材のリグニン分布

1) 供試材

半環孔材は全部で 7 科、9 属、10 樹種で、そのうち、温帯産 4 樹種、亜熱帯産 1 樹種、熱帯産 5 樹種である (Table 1)。冷温帯には半環孔材が分布していなかった。

2) VIS スペクトルの結果

10 樹種の半環孔材のモイレ呈色反応後の VIS ス

ペクトルは環孔材のような吸収曲線もあり、散孔材のような吸収曲線もあった。それらの VIS スペクトルからの吸光度比値によって、A, B, C, D の 4 つのグループに分けられた。それぞれ 2 樹種、2 樹種、3 樹種、3 樹種であった (Table 13)。

それらの吸収曲線を見ると、A グループの *Melia toosendan* (Fig. 29) は道管と木繊維で比値が変わらない A-2 グループ、*Toona ciliata* は道管より木繊維の方が比値が大きい A-3 グループに属する。2 樹種とも道管と木繊維二次壁のリグニン分布は G 核の比率が比較的高いものと認識した。

Fig. 30 に B-グループの *Paulownia fortunei* の吸収曲線を示した。

Ehretia thrysiflora (Fig. 31) は C-1 グループに、*Juglans regia* と *Morus macroura* は C-2 グループに分けられた。

D-グループに分けられた 3 樹種は環孔材と同様

Table 13. The peak position and ratio of absorbance in the semi-ring-porous woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
A-2 group:								
<i>Melia tosendan</i>	—	0.529	—	0.622	—	0.755	—	0.491
A-3 group:								
<i>Toona ciliata</i>	—	0.453	—	0.453	—	0.768	—	0.768
average:		0.491		0.538		0.762		0.629
B-group:								
<i>Paulownia fortunei</i>	—	0.541	—	0.736	—	0.756	510.0	1.116
<i>Toona ciliata</i> var. <i>yunnanensis</i>	—	0.486	—	0.559	—	0.744	515.0	1.302
average:		0.514		0.648		0.750		1.209
C-1 group:								
<i>Ehretia thyrsoiflora</i>	—	0.359	—	0.461	515.0	1.516	520.0	1.495
C-2 group:								
<i>Juglans regia</i>	—	0.689	—	0.679	515.0	1.311	515.0	1.598
<i>Morus macroura</i>	—	0.582	—	0.757	505.0	1.114	515.0	1.345
average:		0.543		0.632		1.314		1.479
D-group:								
<i>Castanopsis delavayi</i>	—	0.633	505.0	1.050	515.0	1.159	520.0	1.285
<i>Fagus longipetiolata</i>	—	0.596	515.0	1.339	520.0	1.636	515.0	1.791
<i>Fraxinus floribunda</i>	—	0.869	510.0	1.234	151.0	1.409	515.0	1.487
average:		0.699		1.208		1.401		1.521

※Early W.: Early wood; Late W.: Late wood;

Peak: Peak position; Ratio: Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm.

なりグニン分布を示した。それらの吸光度比の平均値は早材道管では0.699で1より小さいが、晩材道管では1.208に達し、木繊維の1.4と1.5の数値に接近している。その吸収ピークと比値は *Castanopsis delavayi*, *Fraxinus floribunda* と *Fagus longipetiolata* (Fig. 32) の3樹種は晩材道管、早材木繊維そして晩材木繊維の二次壁におけるGS-リグニンはS核が多いが、早材道管ではG核の比率が高いことを示している。

6. 要 約

1) 道管配列によるリグニンの分布

無孔材: 無孔材の *Tetracentron sinense* は仮道管二次壁に主にG-リグニンが含まれているAグループのリグニン分布である。

その早材部仮道管、晩材部仮道管と特殊な仮道管のUVスペクトルとVISスペクトルは、針葉樹材仮道管と似ており、無孔材のリグニン分布はG-リ

グニンが非常に多いと考えられる。しかし、VISスペクトルは針葉樹のものより少し膨らみがあり、S-リグニンも僅かに含まれている可能性が示された。

環孔材: 環孔材は9樹種ではほぼ同じリグニン分布をしており、全部Dグループに分けられた。それらの孔圏部の大径道管の二次壁では主にG-リグニンであったが、晩材部の厚壁の小径道管ではS-リグニンに富んでいた。しかし、晩材小径道管のS核の比率は木繊維よりかなり小さかった。

環孔材の道管二次壁のこのようなリグニン分布の年輪内の差異は日本産環孔材ミズナラ^{60,61)}にも認められている。環孔材の道管二次壁GS-リグニン分布の違いは道管の形態上の差異から由来すると考えられる。

放射孔材: VISスペクトルの結果より実験された4樹種の放射孔材は全部Eグループに分けられ

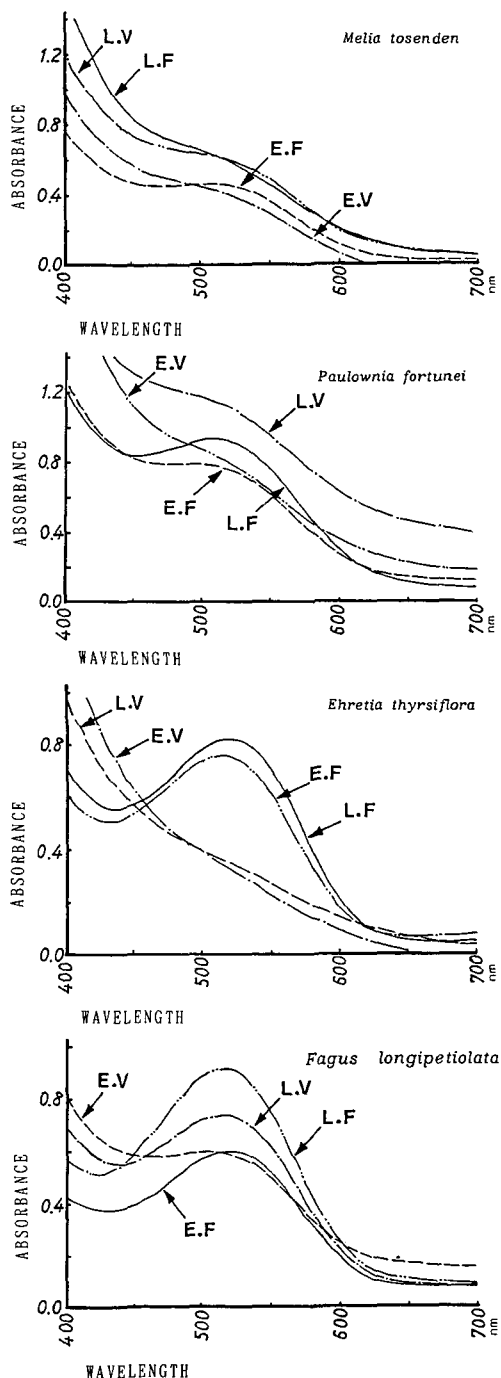


Fig. 29~32. VIS-spectra of A·B·C·D-lignin distribution groups in the semi-ring-porous woods after staining with Mäule reaction.

* E. F: Fiber in early wood;
L. F: Fiber in late wood;
E. V: Vessel in early wood;
L. V: Vessel in late wood.

た。それらの道管・木繊維二次壁とともにS核に富んでいた。放射孔材では道管二次壁にもS核が多く含まれることは、道管径が年輪内ではほぼ均一で、なおかつ厚壁であることと関係があるかも知れない。

散孔材：散孔材のGS-リグニン分布は5つのグループにわたっているが、A、C及びEグループの占有率はそれぞれ27%、39%、25%となり、B、Dのものは僅か(5%、3%)であった。Aグループの散孔材は殆ど熱帯材であった。Cグループのものは30樹種で、全散孔材の39%を占め、そのうち、冷温帯と温帯の樹種が多かった。Dグループのものは2樹種で、早・晩材の道管の径に大きな差があり、環孔材と似たものである。Eグループは20樹種で、全散孔材の25%を占めている。

半環孔材：10樹種の半環孔材には道管配列は環孔材に類似のものから散孔材と似ているものまであった。VISスペクトルの結果によって、それらのリグニン分布はこのような道管配列の変動と一致することが明らかにされた。環孔材的傾向がある3樹種はDグループの分布であった。他のものは散孔材的でそのスペクトルも様々で、Aグループ(2樹種)、Bグループ(2樹種)、Cグループ(3樹種)に分けられた。

2) リグニン分布のグループと道管配列

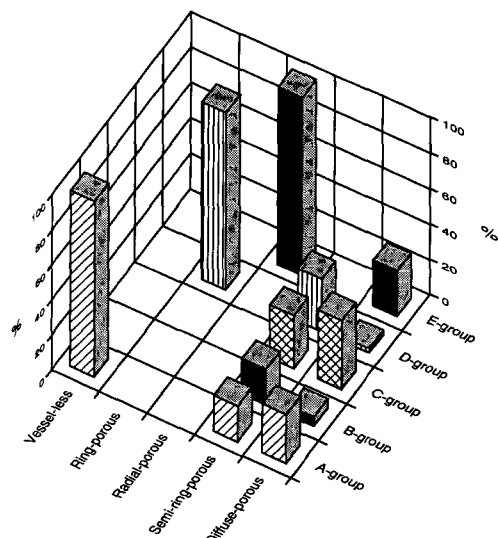


Fig. 33. The GS-lignin distribution on porosity form of vessels.

A, B, C, D, E のリグニン分布グループでの無孔材, 環孔材, 半環孔材, 散孔材と放射孔材の占有率をグラフにした (Fig. 33)。

無孔材, 環孔材と放射孔材は, それぞれ A, D と E のグループに属した。これは無孔材は針葉樹と同じく仮道管があること, また, 環孔材と放射孔材が道管配列ではそれぞれ顕著な特徴を持つというように木材組織の特徴が, リグニンの分布に反映されているのであろう。一方, 散孔材と半環孔材は5つのグループにわたって分布した。散孔材の道管の配列様式と道管要素の形態は多様であり, リグニンの分布もすべてのグループにわたった。また, 半環孔材は環孔材と似たもの及び散孔材と似たものの両方があったので, そのリグニン分布も複雑になったと考えられる。即ち, 広葉樹リグニンの不均一性は広葉樹の道管配列と密接な関連があることが示唆された。

V. 生育地によるリグニン分布の変動

1. 生育地と供試材

Table 14. The peak position and ratio of absorbance in the C, D- and E-group of cold-temperate woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
C-group :								
<i>Tilia paucicostata</i>	—	0.569	—	0.692	510.0	1.111	510.0	1.126
<i>Tilia chinensis</i>	—	0.620	—	0.712	510.0	1.124	510.0	1.132
<i>Populus haoana</i>	—	0.402	—	0.402	505.0	1.033	505.0	1.043
<i>Betula albo-sinensis</i>	—	0.835	—	0.869	515.0	1.385	520.0	1.414
<i>Acer forrestii</i>	—	0.691	—	0.703	515.0	1.252	520.0	1.328
<i>Rhododendron rubiginosum</i>	—	0.447	—	0.453	515.0	1.084	505.0	1.105
average :		0.594		0.638		1.165		1.191
D-group :								
<i>Acanthopanax evodiaefolius</i>	—	0.535	520.0	1.086	520.0	1.520	520.0	1.376
E-group :								
<i>Sorbus thibetica</i>	510.0	1.212	500.0	1.279	510.0	1.883	515.0	1.883
<i>Malus rockii</i>	510.0	1.112	505.0	1.232	510.0	1.423	510.0	1.413
<i>Lithocarpus dealbatus</i>	510.0	1.067	515.0	1.094	520.0	1.221	525.0	1.416
<i>Quercus aquifolioides</i>	500.0	1.032	500.0	1.063	505.0	1.480	500.0	1.947
average :		1.106		1.167		1.502		1.665

※Early W. : Early wood ; Late W. : Late wood ;
Peak : Peak position ; Ratio : Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm

前述のように, 雲南省は大まかに4つの植物地域に分けられた。即ち, 西北の高山冷温帯植物地域 (冷温帯と略す), 中部高原の温帯植物地域 (温帯と略す), 東南部の低山丘陵の熱帯植物と亜熱帯植物

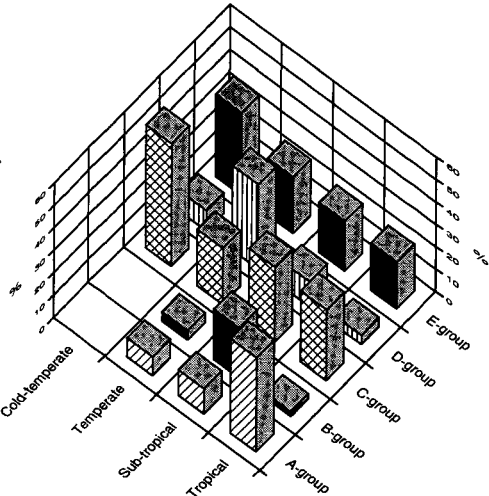


Fig. 34. The relation to GS-lignin distribution and tree habitat.

Table 15. The peak position and ratio of absorbance in the A-, B- and C-group of temperate woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
A-group :								
<i>Tetracentron sinense</i>	—	—	—	—	—	0.435	—	0.358
<i>Populus yunnanensis</i>	—	0.510	—	0.525	500.0	0.931	500.0	0.904
B-group :								
<i>Paulownia fortunei</i>	—	0.541	—	0.736	—	0.756	510.0	1.116
C-group :								
<i>Cinnamomum camphora</i>	—	0.827	—	0.727	510.0	1.199	515.0	1.648
<i>Schima argentea</i>	—	0.720	—	0.732	510.0	1.132	510.0	1.378
<i>Exbucklandia populnea</i>	—	0.705	—	0.765	520.0	1.534	520.0	1.529
<i>Meliosma cuneifolia</i>	—	0.478	—	0.537	505.0	1.268	515.0	1.476
<i>Juglans regia</i>	—	0.689	—	0.679	515.0	1.311	515.0	1.598
<i>Rehderodendron macrocarpum</i>	—	0.529	—	0.508	500.0	1.043	500.0	1.032
average :		0.658		0.658		1.248		1.444

*Early W.: Early wood; Late W.: Late wood;

Peak : Peak position; Ratio : Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm.

Table 16. The peak position and ratio of absorbance in the D- and E-group of temperate woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
D-group :								
<i>Machilus yunnanensis</i>	—	0.821	510.0	1.189	510.0	1.567	515.0	1.763
<i>Sassafras tsumu</i>	—	0.488	510.0	1.145	510.0	1.216	510.0	1.247
<i>Castanea mollissima</i>	—	0.664	515.0	1.234	520.0	1.178	520.0	1.541
<i>Castanopsis delavayi</i>	—	0.633	505.0	1.050	515.0	1.159	520.0	1.285
<i>Fagus longipetiolata</i>	—	0.596	515.0	1.339	520.0	1.636	515.0	1.791
<i>Quercus acutissima</i>	—	0.550	500.0	1.064	500.0	1.504	510.0	1.660
<i>Quercus yunnanensis</i>	—	0.453	510.0	1.161	510.0	1.403	505.0	1.201
<i>Celtis kunmingensis</i>	—	0.659	510.0	1.089	505.0	1.093	515.0	1.323
<i>Catalpa duclouxii</i>	—	0.649	510.0	1.060	510.0	1.057	505.0	1.116
average :		0.631		1.148		1.313		1.436
E-group :								
<i>Magnolia heptapeta</i>	510.0	1.189	510.0	1.116	520.0	1.634	515.0	1.482
<i>Phoebe nanmu</i>	510.0	1.173	510.0	1.209	510.0	1.439	510.0	1.622
<i>Alnus nepalensis</i>	505.0	1.051	510.0	1.105	515.0	1.318	520.0	1.433
<i>Cyclobalanopsis delavayi</i>	500.0	1.031	500.0	1.050	520.0	1.445	520.0	1.490
<i>Euonymus yunnanensis</i>	510.0	1.046	505.0	1.181	520.0	1.472	520.0	1.424
<i>Diosphyros kaki</i>	510.0	1.430	510.0	1.249	515.0	1.828	515.0	1.582
average :		1.153		1.153		1.523		1.505

*Early W.: Early wood; Late W.: Late wood;

Peak : Peak position; Ratio : Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm.

Table 17. The peak position and ratio of absorbance in the A-, B-, C-, D-, and E-group of sub-tropical woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
A-group :								
<i>Gynocardia odorata</i>	—	0.394	—	0.394	—	0.336	—	0.336
<i>Callicarpa arborea</i>	—	0.699	—	0.716	—	0.684	—	0.634
average :		0.546		0.555		0.510		0.485
B-group :								
<i>Actinodaphne henryi</i>	—	0.485	—	0.509	—	0.787	510.0	1.094
<i>Darbergia szemaoensis</i>	—	0.613	—	0.602	—	0.489	505.0	1.142
<i>Aphananthe cuspidata</i>	—	0.694	—	0.759	—	0.776	515.0	1.145
<i>Toona ciliata</i> war. <i>yunnanensis</i>	—	0.486	—	0.559	—	0.744	515.0	1.302
average :		0.570		0.607		0.699		1.171
C-group :								
<i>Manglietia megaphylla</i>	—	0.542	—	0.649	510.0	1.037	510.0	1.030
<i>Alseodaphne andersonii</i>	—	0.670	—	0.599	515.0	1.673	515.0	1.490
<i>Schima wallichii</i>	—	0.763	—	0.847	510.0	1.283	515.0	1.354
<i>Saurauia tristyla</i>	—	0.565	—	0.605	520.0	1.376	520.0	1.333
<i>Betula alnoides</i>	—	0.845	—	0.859	515.0	1.556	515.0	1.839
<i>Cordia dichotoma</i>	—	0.556	—	0.458	515.0	1.101	510.0	1.097
average :		0.657		0.670		1.338		1.357
D-group :								
<i>Aesculus wangii</i>	—	0.776	500.0	1.060	515.0	1.144	515.0	1.477
<i>Pistacia chinensis</i>	—	0.968	510.0	1.129	510.0	1.485	510.0	1.688
average :		0.872		1.095		1.241		1.583
E-group :								
<i>Beilschmiedia linocieroides</i>	500.0	1.092	505.0	1.075	515.0	1.648	520.0	1.724
<i>Trigonobalanus doichangensis</i>	505.0	1.093	500.0	1.060	520.0	1.626	520.0	1.556
<i>Camptotheca acuminata</i>	505.0	1.074	510.0	1.127	510.0	1.177	515.0	1.238
<i>Adina cordifolia</i>	510.0	1.222	510.0	1.222	525.0	1.651	525.0	1.651
average :		1.120		1.121		1.526		1.542

※Early W. : Early wood ; Late W. : Late wood ;

Peak : Peak position ; Ratio : Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm.

地域（熱帯・亜熱帯と略す）である（Fig. 1）。本研究で用いた試料は、これらの植物地域の生立木から採集した材片と材鑑で、冷温帯材 11 樹種、温帯材 24 樹種、亜熱帯材 18 樹種及び熱帯材 48 樹種であった。

2. 生育地別広葉樹材のリグニン分布の特徴

1) 生育地とリグニン分布

数値化された VIS スペクトルの結果、すなわち

A 520 nm/A 420 nm または Amax/Amin の比值によるリグニン分布のグループとそのグループに分けられた樹種の生育地との関係を Fig. 34 に示す。

冷温帯：冷温帯材の GS-リグニン分布は、A, B グループのものではなく、C, D, E の 3 つのグループに分けられた（Table 14 ; Fig. 34）。また、C, D, E グループのうち、道管では G-リグニンがリッチ、木繊維では S-リグニンがリッチの C グループの占

Table 18. The peak position and ratio of absorbance in the A- and B-group of tropical woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
A-group :								
<i>Horsfieldia tetraptera</i>	—	0.785	—	0.785	—	0.795	—	0.777
<i>Lagerstroemia tomentosa</i>	—	0.563	—	0.544	—	0.590	—	0.487
<i>Duabanga grandiflora</i>	—	0.556	—	0.556	—	0.431	—	0.431
<i>Homalium laoticum</i>	—	0.598	—	0.598	—	0.604	—	0.604
<i>Tetrameles nudiflora</i>	—	0.451	—	0.451	—	0.542	—	0.542
<i>Bombax ceiba</i>	—	0.460	—	0.460	—	0.523	—	0.523
<i>Bischofia javanica</i>	—	0.603	—	0.603	—	0.361	—	0.361
<i>Cleistanthus sumatranus</i>	—	0.657	—	0.587	—	0.537	—	0.560
<i>Baccaurea ramiflora</i>	—	0.392	—	0.392	—	0.392	—	0.392
<i>Dalbergia fusca</i>	—	0.516	—	0.516	—	0.588	—	0.588
<i>Erythrina arborescens</i>	—	0.576	—	0.576	—	0.753	—	0.753
<i>Erythrina lithosperma</i>	—	0.383	—	0.383	—	0.734	—	0.734
<i>Melia tosendan</i>	—	0.529	—	0.622	—	0.755	—	0.491
<i>Toona ciliata</i>	—	0.453	—	0.453	—	0.768	—	0.768
<i>Pterocarya tonkinensis</i>	—	0.658	—	0.654	—	0.779	—	0.814
<i>Alstonia scholaris</i>	—	0.617	—	0.617	—	0.615	—	0.615
<i>Anthocephalus chinensis</i>	—	0.371	—	0.371	—	0.324	—	0.324
<i>Gmelina arborea</i>	—	0.356	—	0.356	—	0.307	—	0.307
<i>Vilex quinata</i> var. <i>Puberula</i>	—	0.697	—	0.767	—	0.699	—	0.838
<i>Gallicarpa poilanei</i>	—	0.401	—	0.401	—	0.308	—	0.308
average :		0.531		0.575		0.570		0.561
B-group :								
<i>Macaranga denticulata</i>	—	0.469	—	0.714	—	0.795	515.0	1.152

※Early W. : Early wood ; Late W. : Late wood ;

Peak : Peak position ; Ratio : Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm.

有率が最も高く、55% (6 樹種) となった。次に E グループで 36% (4 樹種)、最も少ないのは D グループで 1 樹種だけであった。

温帯：温帯材の GS-リグニン分布は A~E のすべてのグループに分けられた。また、そのグループ別の占有率はかなり違った (Table 15, 16 ; Fig. 34)。A グループは 2 樹種 (8%)、B グループは 1 樹種 (4%) しかなかった。一方、C グループは 6 樹種 (25%) を占め、D グループは 9 樹種 (38%)、E グループは 6 樹種 (25%) であった。C、D と E グループの占有率は高かった。

亜熱帯：亜熱帯材の GS-リグニン分布は、A グループは 2 樹種 (11%)、B グループは 4 樹種 (22%)、C グループは 6 樹種 (33%)、D グループは 2 樹種 (11%)、E グループは 4 樹種

(22%) であった (Table 17 ; Fig. 34)。

亜熱帯材のグループ別の樹種占有率は、C グループが最大で 33% に達したが、B グループの 22% の占有は非常に目だっている。この値は各生育地の中で最も大きいものであった。亜熱帯は熱帯と温帯の中間区域である。B グループは道管・木繊維とともに G-リグニンに富む A グループと道管は G-リグニンに富み、木繊維は S-リグニンに富む C-グループの中間型であることはこの中間型の気候帯と関連するかも知れない。

熱帯：熱帯材の GS-リグニン分布は、A グループは 20 樹種 (42%)、B グループは 1 樹種 (2%)、C グループは 15 樹種 (31%)、D グループは 2 樹種 (4%)、E グループは 10 樹種 (21%) であった。B、D グループのものが僅かであり、A、C、E のもの

Table 19. The peak position and ratio of absorbance in the C-, D- and E-group of tropical woods

Species	Vessel				Fiber			
	Early W.		Late W.		Early W.		Late W.	
	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio	Peak	Ratio
C-group :								
<i>Knema furfuracea</i>	—	0.861	—	0.928	520.0	1.345	515.0	1.322
<i>Dipterocarpus turbinatus</i>	—	0.711	—	0.711	520.0	1.715	520.0	1.715
<i>Anogeissus acuminata</i>	—	0.789	—	0.789	505.0	1.304	505.0	1.304
<i>Terminalia myriocarpa</i>	—	0.756	—	0.757	505.0	1.260	510.0	1.275
<i>Pterospermum lanceaefolium</i>	—	0.712	—	0.712	520.0	1.634	520.0	1.634
<i>Cassia siamea</i>	—	0.730	—	0.730	510.0	1.277	510.0	1.277
<i>Albizia lucidior</i>	—	0.618	—	0.729	510.0	1.249	515.0	1.155
<i>Trema orientalis</i>	—	0.353	—	0.353	510.0	1.106	510.0	1.106
<i>Ulmus lanceaefolia</i>	—	0.773	—	0.773	510.0	1.128	510.0	1.128
<i>Morus macroura</i>	—	0.582	—	0.757	505.0	1.114	515.0	1.345
<i>Garuga pinnata</i>	—	0.857	—	0.857	520.0	1.498	520.0	1.498
<i>Aphanamixis grandifolia</i>	—	0.796	—	0.796	510.0	1.229	510.0	1.229
<i>Pometia tomentosa</i>	—	0.814	—	0.808	520.0	1.375	515.0	1.376
<i>Ehretia thyrsoiflora</i>	—	0.359	—	0.461	515.0	1.516	520.0	1.495
<i>Stereospermum personatum</i>	—	0.753	—	0.753	520.0	1.573	520.0	1.573
average :		0.698		0.728		1.355		1.362
D-group :								
<i>Choerospondias axillaris</i>	—	0.713	505.0	1.140	515.0	1.438	515.0	1.879
<i>Fraxinus floribunda</i>	—	0.869	510.0	1.234	515.0	1.409	515.0	1.487
average :		0.791		1.187		1.423		1.683
E-group :								
<i>Michelia alba</i>	505.0	1.056	505.0	1.035	515.0	1.494	520.0	1.582
<i>Paramichelia baillonii</i>	510.0	1.063	510.0	1.168	520.0	1.314	520.0	1.548
<i>Talauma gitingensis</i>	515.0	1.032	510.0	1.045	515.0	1.061	520.0	1.341
<i>Tsoongiodendron odorum</i>	505.0	1.041	510.0	1.199	510.0	1.059	510.0	1.056
<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	500.0	1.087	500.0	1.078	510.0	1.374	515.0	1.676
<i>Liquidambar formosana</i>	515.0	1.360	515.0	1.229	515.0	1.391	520.0	1.925
<i>Chukrasia tabularis</i>	505.0	1.063	505.0	1.155	515.0	1.666	515.0	1.670
<i>Pistacia weinmannifolia</i>	510.0	1.309	510.0	1.379	510.0	1.796	515.0	1.793
<i>Pouteria grandifolia</i>	510.0	1.166	515.0	1.251	520.0	1.330	520.0	1.447
<i>Markhamia stipulata</i>	510.0	1.098	510.0	1.122	515.0	1.840	515.0	1.617
average :		1.137		1.162		1.474		1.622

*Early W. : Early wood ; Late W. : Late wood ;

Peak : Peak position ; Ratio : Ratio of Amax/Amin or A520 nm/A420 nm.

が多かった (Table 18, 19 ; Fig. 34)。最も特徴的なものは A グループの高い占有率である。

2) グループ別の各生育地域の樹種占有率

角度を変えて、グループ別の各生育地域の樹種数を調べてみた。

各気候帯における占有率では、A グループには、冷温帯材はなかった。温帯材と亜熱帯はそれぞれ2樹種 (8%, 11%) しかなかった。しかし、熱帯材は20 樹種 (42%) で、最も多かった。

B グループのうち、温帯材は1 樹種 (4%), 亜熱

Table 20. The peak position and ratio of UV absorbance and VIS absorbance after Wiesner and Mäule reactions in some tropical woods

	vessel		fiber	
(1). UV Spectra :	Peak position in UV spectra	$\frac{A_{274\text{ nm}}}{A_{280\text{ nm}}}$	Peak position in UV spectra	$\frac{A_{274\text{ nm}}}{A_{280\text{ nm}}}$
<i>Duabanga grandiflora</i>	280 nm	0.890	280 nm	0.920
<i>Toona ciliata</i>	280 nm	0.900	280 nm	0.940
<i>Anthocephalus chinensis</i>	279 nm	0.940	279 nm	0.950
<i>Gmelina arborea</i>	281 nm	0.950	280 nm	0.960
<i>Callicarpa poilanei</i>	279 nm	0.920	279 nm	0.940
(2). Wiesner reaction :	Peak position in VIS spectra	Absor- bance	Peak position in VIS spectra	Absor- bance
<i>Duabanga grandiflora</i>	565 nm	0.748	565 nm	0.563
<i>Toona ciliata</i>	565 nm	0.578	565 nm	0.287
<i>Anthocephalus chinensis</i>	565 nm	0.785	565 nm	0.365
<i>Gmelina arborea</i>	560 nm	1.120	560 nm	0.465
<i>Callicarpa poilanei</i>	560 nm	0.882	565 nm	0.485
(3). Mäule reaction :	Peak position in UV spectra	$\frac{A_{520\text{ nm}}}{A_{420\text{ nm}}}$	Peak position in VIS spectra	$\frac{A_{520\text{ nm}}}{A_{420\text{ nm}}}$
<i>Duabanga grandiflora</i>	—	0.556	—	0.431
<i>Toona ciliata</i>	—	0.453	—	0.768
<i>Anthocephalus chinensis</i>	—	0.371	—	0.324
<i>Gmelina arborea</i>	—	0.356	—	0.307
<i>Callicarpa poilanei</i>	—	0.401	—	0.308

帯材は4樹種(22%), 熱帯材は1樹種(2%)であった。熱帯と温帯の中間地域の亜熱帯の樹種の占有率は最も高かった。

Cグループのうち, 冷温帯材6樹種(55%), 温帯材は6樹種(25%), 亜熱帯材は6樹種(33%), 熱帯材は15樹種(31%)であった。いずれの生育地でも, このグループのリグニン分布が多くを占めているが, 占有率から見ると冷温帯で最も高かった。

Dグループのうち, 冷温帯材1樹種(9%), 温帯材は9樹種(38%), 亜熱帯材は2樹種(11%), 熱帯材は2樹種(4%)であった。いずれの生育地でも, このグループのリグニン分布を持っているが, 温帯を生育地とする樹種数の占有率が最も高かった。

Eグループのうち, 冷温帯材は4樹種(36%), 温帯材は6樹種(25%), 亜熱帯材は4樹種(22%), 熱帯材は10樹種(21%)であり, 各生育地でCグループに次いで占有率が高く, 特に冷温帯で著しかった。

また, 5つのグループのうち, Cグループのリグニン分布を持つものは33樹種で, 最も多かった。道管壁ではG-リグニンに富み, 木繊維ではS-リグ

ニンに富むリグニン分布は広葉樹の最も一般的なリグニン分布であると思われる。

3. 熱帯材のリグニン分布の特徴

前述のように, 測定対象とした熱帯材のうち多くの樹種でAグループのリグニン分布が認められた。これが, 熱帯材の特有の性質かどうかを確かめるために, Aグループの*Duabanga grandiflora*, *Toona ciliata*, *Anthocephalus chinensis*, *Gmelina arborea*, *Callicarpa poilanei*の5樹種について, 詳細な研究を進め, 組織化学の方法だけではなく, 他の化学的分析法も用いて検討した。

1) VIS スペクトルの結果

モイレ呈色反応: 既に述べたようにAグループのVISスペクトルは道管と木繊維いずれも滑らかな下降線を示す。この5樹種のモイレ反応の吸収曲線も同じ形をしている。Fig. 35にはその例として*Duabanga grandiflora*のスペクトルを示した。

ウィスナー呈色反応: 例としてFig. 36に*Duabanga grandiflora*のVISスペクトルを示した。樹種の間で吸収ピークの位置は560~565nmの範囲で若干の差異があったが, 同一樹種では道管

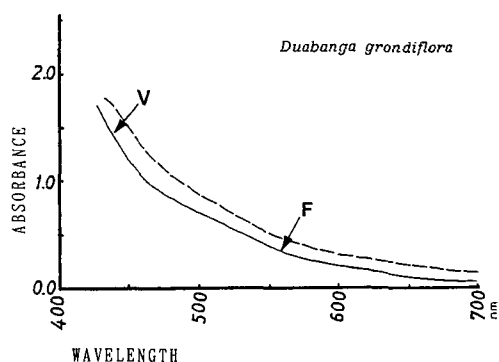


Fig. 35. VIS-spectra in the tropical wood after staining with Mäule reaction.
* F: fiber; V: vessel.

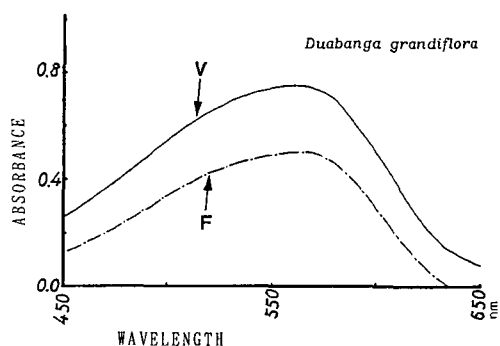


Fig. 36. VIS-spectra in the tropical wood after staining with Wiesner reaction.
* F: fiber; V: vessel.

と木繊維の吸収ピークがほぼ同一位置に現れ、それらのリグニンはG核の比率が高いという結果であった。また、ピーク位置の吸光度は道管二次壁で木繊維二次壁より高かったが、木繊維細胞間層の吸光度は最高であった。これはG-リグニンの濃度が木繊維二次壁より道管で高く、さらに木繊維細胞間層でより高かったことを示唆している。

2) UV スペクトルの結果

道管と木繊維の二次壁におけるリグニンの分布を紫外線顕微分光法で調べた結果は5樹種においてほとんど同じであった。

Table 20 にそれらのUV 吸収スペクトルからの吸光度比を示した。また、例として、*Duabanga grandiflora* のスペクトル (Fig. 37) を示した。道管二次壁の吸収曲線は5樹種とも279~281 nm の位置に吸収極大が現れた。A 274 nm/A 280 nm 吸光度比は、最大0.95、最小0.89 となり、いずれも1

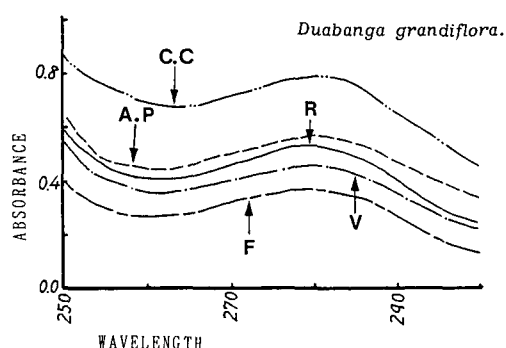


Fig. 37. UV-spectra in the tropical wood.
* F: fiber; V: vessel; R: ray; A. P: axial parenchyma; C. C: cell corner.

より小さかった。Fujii ら²²⁾ の針葉樹材の A 273 nm/A 280 nm 吸光度比の結果と似ており、G 核が多いことが示唆される、また、木繊維二次壁の UV スペクトルでも、吸収極大は274 nm 付近ではなくて、道管と同様に279~280 nm の位置に認められた。それらの A 274 nm/A 280 nm の比値は1 よりも小さく、0.92 から0.96 であり、道管と同じくG 核の比率が高いことが示唆される。

3つの顕微分光法による結果は一致していた。5樹種の熱帯材の木繊維二次壁ではGS-リグニンの構成比率にG核が多いことが示唆された。

3) アルカリ抽出前後のUV スペクトル

熱帯材は、一般にリグニン以外のポリフェノール類が多数含まれている。ポリフェノール縮合体を除去するのに熱アルカリ処理法は評価されている。萩山ら^{62,63)} は南洋材のリグニン特性はアルカリ可溶分により惹起されたものと指摘した。

アルカリ抽出によって5樹種のUV スペクトルの結果がどの位の影響を受けるかを調べるために、前処理としてエタノール・ベンゼン(1:2)混液で6時間沸騰還流抽出し、その後、1%水酸化ナトリウム水溶液で2時間沸騰還流抽出した。

5樹種の材の抽出処理した試料と未処理の試料との紫外線顕微分光測光を行った。それらの道管、木繊維、放射柔細胞、軸方向柔細胞の二次壁と木繊維細胞間層のUV スペクトルを比較した。Table 21 に示されているように、同じ木部構成要素であるかぎり、抽出処理された材と未処理の材とのそれらの吸収極大の位置はほぼ変わらなかった。従って、ポリフェノールの存在はGS-リグニンの定性測定とそのUV スペクトルにはほとんど影響を及

Table 21. The Comparison of UV-absorbance data between NaOH(1%) extraction and non-extraction in some tropical woods

Species	Element	After ethanol-benzene and NaOH(1%) extraction				After ethanol-benzene extraction only			
		274 nm	280 nm	274/280	Peak	274 nm	280 nm	274/280	Peak
<i>Duabanga grandiflora</i>	F	0.346	0.364	0.95	279	0.342	0.372	0.91	280
	V	0.400	0.433	0.92	280	0.418	0.464	0.90	280
	R	0.384	0.410	0.94	280	0.480	0.524	0.92	278
	Pa	0.402	0.426	0.94	280	0.518	0.569	0.91	280
	CC	0.634	0.661	0.96	281	0.742	0.796	0.93	280
<i>Toona ciliata</i>	F	0.101	0.112	0.90	278	0.126	0.134	0.94	278
	V	0.217	0.235	0.92	278	0.328	0.363	0.91	280
	R	0.220	0.224	0.98	278	0.459	0.485	0.95	279
	Pa	0.200	0.216	0.92	278	0.484	0.487	0.99	279
	CC	0.516	0.526	0.98	278	0.564	0.582	0.97	279
<i>Anthocephalus chinensis</i>	F	0.347	0.360	0.96	281	0.377	0.396	0.95	280
	V	0.449	0.464	0.97	281	0.617	0.661	0.94	279
	R	0.490	0.507	0.97	281	0.547	0.587	0.93	278
	Pa	0.375	0.406	0.92	278	0.527	0.553	0.95	279
	CC	0.520	0.554	0.94	282	0.588	0.630	0.93	280
<i>Callicarpa poilanei</i>	F	0.297	0.303	0.98	281	0.329	0.350	0.94	278
	V	0.418	0.444	0.94	280	0.473	0.510	0.92	278
	R	0.323	0.345	0.94	280	0.415	0.444	0.93	278
	Pa	0.308	0.340	0.91	280	0.424	0.450	0.94	278
	CC	0.633	0.667	0.95	279	0.823	0.869	0.94	278
<i>Gmelina arborea</i>	F	0.236	0.240	0.98	278	0.310	0.323	0.96	280
	V	0.342	0.354	0.97	277	0.403	0.424	0.95	281
	R	0.153	0.158	0.97	279	0.338	0.377	0.90	281
	Pa	0.131	0.154	0.85	280	0.326	0.361	0.90	281
	CC	0.499	0.537	0.93	280	0.568	0.610	0.93	281

F: Fiber; V: Vessel; R: Ray parenchyma; Pa: Axial parenchyma; CC: Cell corner of fibers;
Peak: Peak position in UV spectra; 274/280: A274 nm/A280 nm.

ばさないと考えられる。

しかし、アルカリで処理した材の UV スペクトルの吸収極大位置の吸光度が下がった。また、木繊維及び道管より柔細胞二次壁のほうが吸光度の低下が著しかった。吸光度はリグニン濃度をある程度示すと考えることができるので、アルカリ抽出によって、アルカリ可溶分のリグニンが抽出されたと考えられる。柔細胞のほうが吸光度はかなり低下したので、アルカリ可溶分リグニンは柔細胞に多く含まれていると考えられる²⁶⁾。

5 樹種の熱帯材の道管と木繊維の GS-リグニンでは G 核の比率が高いことは UV と VIS スペクトルの結果が一致して示している。

4) ニトロベンゼン酸化による S/V 比值とクラフソン・リグニン含有量

G-リグニンと S-リグニンはフェニルプロパン単位 (C₆-C₃) を基本骨格とする点では共通であるが、メトキシル基の含有率が違う。5 樹種の熱帯材のリグニン性質をもっと正確に明らかにするために、これら 5 樹種の熱帯材と比較のために他の 2, 3 の樹種についてのクラフソン・リグニン含有量とニトロベンゼン酸化によるシリングアルデヒド/パニリン (S/V) の比を測定した。結果を Table 22 に示す。

4 樹種の熱帯材と *Catalpa duclouxii* の S/V 比值は全部 1 より小さいが、対照とした他の材では 1 より大きかった。川村ら^{64,65)} は S/V 値においては熱

Table 22. Klason lignin content and syringaldehyde/vanillin(S/V) molar ratio obtained from alkaline nitro-benzene oxidation in some Yunnan hardwoods

Species	Klason lignin content(%)		Ratio of S/V	
	before 1%NaOH	after 1%NaOH	before 1%NaOH	after 1%NaOH
(1) cold-temperate wood :				
<i>Acer forrestii</i>	23.09		1.63	
<i>Betula albo-sinensis</i>	23.63		2.67	
(2) temperate wood :				
<i>Alnus nepalensis</i>	27.09		1.46	
<i>Catalpa duclouxii</i>	26.68		0.85	
<i>Euonymus yunnanensis</i>	25.63		2.04	
(3) sub-tropical wood :				
<i>Betula alnoides</i>	25.54		1.66	
(4) tropical wood :				
<i>Toona ciliata</i>	16.91	16.31	—	—
<i>Duabanga grandifolia</i>	27.88	28.38	0.32	0.45
<i>Callicarpa poilanei</i>	25.50	26.25	0.26	0.37
<i>Gmelina arborea</i>	21.98	26.51	0.44	0.40
<i>Anthocephalus chinensis</i>	20.76	22.45	0.53	0.58

Table 23. Comparisons of the absorption ratios in some congeneric species

Species	Ratio of VIS absorbance				G.	Porosity	Habitat
	E. V	L. V	E. F	L. F			
<i>Erythrina arborescens</i>	0.576	0.576	0.753	0.753	A	diffuse-porous	Thop.
<i>Erythrina lithosperma</i>	0.383	0.383	0.734	0.734	A	diffuse-porous	Trop.
<i>Tilla paucicostata</i>	0.569	0.692	1.111	1.126	C	diffuse-porous	Cold-T.
<i>Thlia chinensis</i>	0.620	0.712	1.124	1.132	C	diffuse-porous	Cold-T.
<i>Betula alnoides</i>	0.845	0.859	1.556	1.839	C	diffuse-porous	Sub-T.
<i>Betula albo-sinensis</i>	0.835	0.869	1.385	1.414	C	diffuse-porous	Cold-T.
<i>Callicarpa arborea</i>	0.699	0.716	0.684	0.634	A	diffuse-porous	Sub-T.
<i>Callicarpa poilanei</i>	0.401	0.401	0.308	0.308	A	diffuse-porous	Trop.
<i>Schima wallichii</i>	0.763	0.847	1.283	1.354	C	diffuse-porous	Sub-T.
<i>Schima argentea</i>	0.720	0.732	1.132	1.378	C	diffuse-porous	Temp.
<i>Quercus acutissima</i>	0.550	1.064	1.504	1.660	D	ring-porous	Temp.
<i>Quercus yunnanensis</i>	0.453	1.161	1.403	1.201	D	ring-porous	Temp.
<i>Quercus aquifolioides</i>	1.032	1.063	1.480	1.947	E	radial porous	Cold-T.
<i>Dalbergia fusca</i>	0.516	0.516	0.588	0.588	A	diffuse-porous	Trop.
<i>Dalbergia szemaoensis</i>	0.613	0.602	0.489	1.142	B	diffuse-porous	Sub-T.
<i>Pistacia weinmannifolia</i>	1.309	1.379	1.796	1.793	E	diffuse-porous	Trop.
<i>Pistacia chinensis</i>	0.968	1.129	1.485	1.688	D	ring-porous	Sub-T.
<i>Populus yunnanensis</i>	0.510	0.525	0.931	0.904	A	diffuse-porous	Temp.
<i>Populus haoana</i>	0.402	0.402	1.033	1.043	C	diffuse-porous	Cold-T.
<i>Toona ciliata</i>	0.453	0.453	0.768	0.768	A	semi ring-porous	Trop.
<i>Toona ciliata</i> var. <i>yunnanensis</i>	0.486	0.559	0.744	1.302	B	semi ring-porous	Sub-T.

*E. V : Vessel in early wood. L. V : Vessel in late wood.

E. F : Fiber in early wood. L. F : Fiber in late wood.

G. : Group of the absorption ratio.

帯産広葉樹材は約1で、温帯産広葉樹材の2~4より低い値を持ち、針葉樹と似ていると報告した。熱帯材4樹種のS/V値の結果はそれと一致した。また、そのアルカリ抽出前後のS/V値には有意差はないことが認められた(Table 22)。ニトロベンゼン酸化によるS/V比の結果は顕微分光法からの結果を支持している。

クラークソン・リグニン含有量は、対象樹種は少ないが、冷温帯材では23~24%、温帯材では25~27%、亜熱帯材では26%であった。一方、熱帯産材では *Toona ciliata* の17%から *Duabanga grandifolia* の28%の広い範囲に分布した。また、熱帯材5樹種のアルカリ抽出でクラークソン・リグニン含有量は若干下がった程度であった(Table 22)。クラークソン・リグニン量から見ると明確な熱帯材の特徴を見出すことはできなかった。

5) Aグループ以外のリグニン分布をもつ熱帯材

Aグループのほか、Bグループに分けられた熱帯材は1樹種だけであった。

Cグループの熱帯材は15樹種あった。それらのA 520 nm/A 420 nm または Amax/Amin 比の平均値は、道管では早材 0.698、晩材 0.728 であり、木繊維では早材 1.355、晩材 1.362 であった。道管と木繊維との二次壁のリグニン分布の差異がはっきりと示された。また、早・晩材で木繊維二次壁の吸光度比によると、晩材のほうが多少高いが、その差は温帯材のものより明瞭でなかった。雲南では、乾季と雨季の違いが生長に影響を与え、一部の熱帯材では温帯材と似た生長期と休止期がある。その結果、成長輪ができ、早晩材の区別が多少認められる。このために、一部の熱帯材でもAグループ以外のリグニン分布が現れたのかも知れない。

Dグループに分けられた熱帯材は2樹種であった。環孔材の *Choerospondias axillaris* と半環孔材の *Fraxinus floribunda* であった。

9樹種はEグループに分けられた。それらのVISスペクトルの4本の吸収曲線は吸収極大を示していた。Amax/Aminの比值は道管二次壁では最小1.032、最大1.379であり、平均値は早材で1.137、晩材で1.162であった。早・晩材の差が非常に小さかった。この特徴は放射孔材と似ている。このグループには、*Talauma gitingensis* などのモクレン科の樹種が3種も含まれていた。

4. 同属樹種の生育地によるリグニン分布の変動

前述のように、冷温帯、温帯、亜熱帯、熱帯の4つの植物地域の樹種のリグニン分布は異なっていた。冷温帯の樹種はC、Eグループのものが多く、温帯の樹種はC、D、Eグループのものが多く、亜熱帯の樹種はBグループのものが多く、熱帯の樹種はAグループのものが最も多く存在していた。

この生育地域の違いによりリグニン分布の違うことが、同属での樹種でも有り得るかを調べた。

本研究で用いた供試材のうち、同属2樹種以上のものは10属であった(Table 23)。それらの樹種の生育地は異なるものと同じであるものの両方があった。生育地の違いによって材構造上の差異が現れることはあるが、本研究の対象樹種にも認められた。亜熱帯の *Pistacia chinensis* は環孔材であるが、熱帯に生育する *Pistacia weinmannifolia* は散孔材である。*Ulmus* 属の温帯樹種は環孔材としてよく知られているが、本研究に用いた *Ulmus lanceaeifolia* は熱帯に生育する散孔材である。

同属のものがあるが、そのリグニン分布が顕著に異なり別々のグループに分けられたものは *Dalbergia*, *Pistacia*, *Populus*, *Toona* 及び *Quercus* の5属であった。

D. fusca と *D. szemaensis* 及び *P. weinmannifolia* と *P. chinensis* の2組の樹種は、前者は熱帯材、後者は亜熱帯材である。前者のリグニン分布はAグループで、後者はBグループとDグループに分類された。

Populus 属の2樹種も、温帯のものと寒温帯のものでリグニン分布の違いを見出した。*P. yunnanensis* はAグループに、*P. haoana* はCグループに分けられた。

Quercus 属の3樹種は環孔材と放射孔材のものであり、それぞれでリグニンの分布がはっきりと異なった。

生育地域が異なり、リグニン分布で同じグループに分けられたものは3属6樹種で、そのうち、VISスペクトルによる吸光度比値がかなり違う組と近い組の両方があった。

熱帯材の *Callicarpa poilanei* は針葉樹と似た吸光度比値を持っていたが、亜熱帯材の *C. arborea* は道管と木繊維の吸光度比値は0.634~0.716であり、熱帯産の *Callicarpa poilanei* よりG核の比率が低かった。

以上の結果により、リグニン分布に対する生育地の影響は認められるが、強いものもあるし、弱いものもあった。本研究の範囲では、異なった生育地に従って、暑いところから寒いところへ木部細胞二次壁にGS-リグニンにS核が増加していく傾向があると考えられる。

5. 要 約

1) G-リグニンに富む熱帯材

実験された48樹種の熱帯広葉材のGS-リグニンは、ほぼ50%は道管と木繊維両方ともにG-リグニンの比率の高いAグループに分けられた。熱帯材リグニン分布のこの特徴は、紫外線顕微分光測光の結果及びウィスナー呈色反応とそのVISスペクトルの結果のいずれでも認められた。また、この特徴は、ニトロベンゼン酸化によるS/V比からも確認された。

2) 熱帯から冷温帯へのS核比率の変動

本研究で測定対象とした熱帯材では、Aグループのものが最も多く存在している。亜熱帯材では、Bグループのものと及びCグループのものが多かった。即ち、熱帯から亜熱帯へと分布域を拡大するに従って、S-リグニンが晩材木繊維に出現し、或いは木繊維の晩材にも早材にも出現したと考えられる。温帯材では、CとDグループのものが多かった。即ち、木繊維の早晩材ともにS-リグニンが多かった。さらに、晩材の道管でも、S-リグニンが増える傾向が認められた。このような傾向がさらに冷温帯に向かって続き、冷温帯の樹種のCグループのものが多く、Eグループのものも多かった。即ち、S-リグニンが木繊維ばかりではなくて、早晩材道管においても増えた。

要するに、熱帯から冷温帯に向かって、生育地の差異によって広葉樹のGS-リグニン分布は、晩材木繊維→早材木繊維→晩材道管→早材道管の順序に、S核の比率が増大する傾向が認められた。

VI. 細胞形態によるリグニン分布の変動

これまで広葉樹木部細胞の二次壁におけるリグニン分布を道管の配列及び生育地の面から論じてきた。その中で、個々の細胞の形態（主に大きさや壁厚）とリグニン分布についても関係があることが予想された。

本章では、対象とした101樹種の道管と木繊維の直径と壁厚を調べ、それらを大きさと厚さによって

分類して、その組ごとの平均値を算出し、それと対応させて二次壁のリグニンの分布を調べ、細胞の形態から広葉樹リグニン分布の不均一性を検討する。

1. 細胞直径と壁厚の測定と分類

1) 測定方法

道管の直径は、管孔の接線径（内径）で表示する。壁厚は測定した数値で表す。木繊維の直径はその測定値を記録し、壁厚はIAWAのList of microscopic features for hardwood identification⁶⁶⁾（以下IAWAのリストと記す）に従い、木繊維の直径と内径の比によって、thin, thin to thick及びthickに分け表示した。測定はSEM写真³⁷⁾、あるいは厚さ約10 μ mの木口面切片を用い、UMSP-80の測光スポットと光学顕微鏡用マイクロメータを併用し、15個の道管と木繊維の直径と壁厚を測定し、平均値を計算した。

2) 道管の直径と壁厚

実際に測定した供試材の道管接線径は最小14~28 μ m (*Euonymus yunnanensis*)で、最大205~380 μ m (*Paulownia fortunei*)であったが、100~200 μ mのものは53樹種あり、最も多かったのも、それを100~150 μ mと150~200 μ mの2級に分けた。道管をその最大接線径(D)の値に基づいて、 $D \leq 100 \mu\text{m}$ (I), $100 < D < 150 \mu\text{m}$ (II), $150 < D < 200 \mu\text{m}$ (III)と $D \geq 200 \mu\text{m}$ (IV)の4級に分けた。本研究で実験された101樹種は無孔材の*Tetracentron sinense*を除いて、I級のものは19樹種、II級のものは29樹種、III級のものは24樹種、IV級のものは28樹種であった。

道管の壁厚は測定値を平均したものである。

3) 木繊維の直径と壁厚

統計の便宜上、測定した木繊維直径のデータを、二捨三入し、10, 15, 20, 25, 30, 35のように、5 μ m毎に記録した。本研究で実験された101樹種の木繊維直径(D)は無孔材の*Tetracentron sinense*を除いて、最小は10~15 μ m (*Euonymus yunnanensis*, *Quercus aquifolioides*)で、最大は19~48 μ m (*Horsfieldia tetratapatia*)であったので、すべての供試材を①D 20-10 μ m (11樹種)、②D 20-15 μ m (21樹種)、③D 25-10 μ m (12樹種)、④D 25-15 μ m (19樹種)、⑤D 30-15 μ m (27樹種)、⑥最大値が $D > 30 \mu\text{m}$ 以上 (11樹種)の6階級の組に分けた。

それらの壁厚は、IAWAのリスト⁶⁶⁾によって、

細胞直径と内こう直径の比によって記録した。木繊維内こう直径が繊維壁の6倍以上の場合には木繊維壁は“very thin”に、内こう直径が繊維壁の6倍以下の場合には“thin to thick”に、内こうが非常に狭い場合には“very thick”に分けた。ただし、本研究では便宜上“very thin”をthinに、“very thick”をthickに置き換えた。

2. 道管の直径とリグニン分布

1) リグニン分布の現れかた

数値化された道管二次壁のAmax/Amin、またはA 520 nm/A 420 nm 吸光度比値を1より大きいもの(Sと略す)と1より小さいもの(Gと略す)の2種に分けた。即ち、GS-リグニンの比率でG核が比較的富んでいたものは“G”と記し、S核が比較的富んでいたものは“S”と記した。早・晩材道管二次壁のリグニン分布を簡略に表現すれば、早・晩材ともG-リグニンに富む場合は“GG”と、早材ではG-リグニンに富み、晩材ではS-リグニンに富む場合は“GS”と記した。また、早・晩材道管ともS核の比率が高かった場合は“SS”と記すことにした。

2) 道管直径とリグニン分布

I級の小径道管のリグニン分布：接線径 $D \leq 100 \mu\text{m}$ の小径道管を持つ樹種は19樹種であった。それらのVISスペクトルによるAmax/AminまたはA 520 nm/A 420 nmの吸光度比の平均値は早材で0.854、晩材で0.925であった。リグニン分布の型を分ければ、“GG”タイプのものは7樹種であり、“GS”タイプのものは2樹種、“SS”タイプのものは10樹種であった。

II級の道管のリグニン分布：接線径 $100 < D < 150 \mu\text{m}$ の中庸な道管をもつ樹種は数が多く、29樹種に達した。それらのVISスペクトルによる吸光度比の平均値は早材で0.799、晩材で0.878であった。“GG”タイプのものは16樹種、“GS”タイプのものは3樹種、“SS”タイプのものは10樹種であった。

すなわち、中庸な道管を持つ組の“GG”タイプの樹種数は、接線径 $D \leq 100 \mu\text{m}$ の小径道管の7樹種よりも多かった。また、“SS”タイプの樹種数は10であり、小径道管の組と同じである。道管の接線径が増えるにしたがって、道管二次壁におけるGS-リグニンの分布は、G核の比率が増える傾向があると示唆された。

III級の道管のリグニン分布：接線径が $150 < D < 200 \mu\text{m}$ の大径道管は24樹種であった。それらのVISスペクトルによる吸光度比の平均値は早・晩材でそれぞれ0.706と0.712であった。そのうち、“GG”タイプのものは20樹種にも達した。“GS”タイプのものは全くなく、“SS”タイプのものは4樹種であった。

すなわち、GS-リグニンの比率が早・晩材ともにG核が比較的富んでいた樹種が増加して、20樹種にも達したが、逆に、早・晩材ともにS核に富んでいた樹種数が大幅に減少し、4樹種であった。大径道管では二次壁におけるGS-リグニンはG核の比率が高かったが、小径道管ではG-リグニンの比率が小さかった。径の差異によってそれらの二次壁におけるGS-リグニンはG核の比率の差異が認められた。

IV級の道管のリグニン分布：接線径 $200 \mu\text{m}$ 以上の特に大径の道管をもつものは28樹種である。VISスペクトルによる吸光度比の平均値は早・晩材でそれぞれ0.597と0.770であった。リグニン分布タイプは次のように現れた。“GG”タイプのものは19樹種、“GS”タイプのものは9樹種、“SS”タイプは皆無であった。この結果によると、GS-リグニン分布では、早・晩材ともに比較的G核の比率が高かったものは、接線径が $150 < D < 200 \mu\text{m}$ と大径道管のグループとはほぼ同数であった。一方、早・晩材ともにS核に富む樹種は皆無であった。

以上の道管の接線径で分けられた4つの組とそのリグニンの表現タイプとの関係をFig. 38にまとめてみた。道管の接線径の増加につれ、“GG”タイプの樹種数が増え、“SS”のタイプの樹種数が減少することがはっきりと現れた。道管の接線径が大きくなれば、道管二次壁におけるGS-リグニンは、G核が増えると考えられる。

Table 24. The classes of tangential diameter of vessels and the absorption ratio of VIS spectra

Class of tangential diameter of vessels	Number of species	Ratio of VIS absorbance	
		E. V	L. V
I ($D < 100 \mu\text{m}$)	19	0.854	0.925
II ($100 < D < 150 \mu\text{m}$)	29	0.799	0.878
III ($150 < D < 200 \mu\text{m}$)	24	0.706	0.712
IV ($D > 200 \mu\text{m}$)	28	0.597	0.770

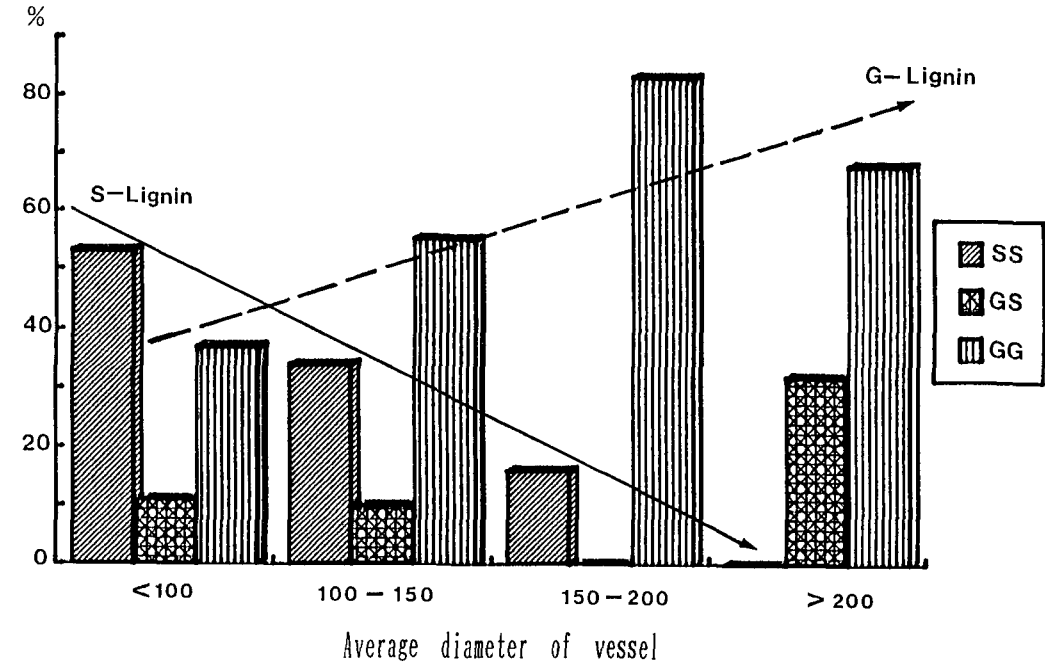


Fig. 38. The relation between the vessel diameter and the type of GS-lignin distribution.

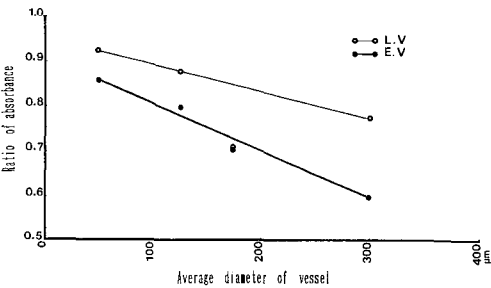


Fig. 39. The relation between the vessel diameter and the ratio of absorbance in VIS-spectra.

3) 道管直径の差異とGS-リグニンの比率
前述の4種類の級に分けられた早材道管のVISスペクトルによる吸光度比の平均値はそれぞれ0.854, 0.799, 0.706, 0.597であり、道管接線径が大きければ、その吸光度比値が小さかったことは一目瞭然である (Table 24)。
晩材道管も同様で、その平均値はそれぞれ0.925, 0.878, 0.712, 0.770であった。最後の数値が少々高くなったのは、接線径が200 μmより大きいIV級の28樹種のうち、数種類の環孔材が含まれたためである。環孔材の晩材小径道管はS-リグニンに富んでいたが、早材道管の接線径によって分

けられたので、全体の比値を高める結果となった。これが原因であると考えられる。

この結果をグラフにした (Fig. 39)。道管の直径が大きければ、二次壁におけるGS-リグニンはS核の比率が低かった、或いはG核の比率が高かったことが認められるようである。

3. 木繊維の直径とリグニン分布

1) 木繊維の直径とリグニン分布

直径階級 I (D 20-10 μm) の木繊維のリグニン分布：木繊維直径の最も小さいグループで、11 樹種が含まれている。VIS スペクトルによる Amax/Amin の吸光度比の平均値は、早材では1.307, 晩材では1.427であった。木繊維二次壁におけるリグニンの構成比率は早・晩材ともにS核に富んでおり、また、早材より晩材のほうでS核の比率がもっと高かったと考えられる。

直径階級 II (D 20-15 μm) の木繊維のリグニン分布：このグループには21 樹種が含まれる。それらのVIS スペクトルによる吸光度比の平均値は、早材では1.279, 晩材では1.349であった。前者と同じ傾向を示したが、早・晩材ともに、吸光度比の平均値は直径階級 I グループのものより低くなった。

直径階級 III (D 25-10 μm) の木繊維のリグニン分

布：12 樹種を持つこのグループは、木繊維の直径は前2者とあまり変わらないが、最大値のほうが少々大きいグループである。VIS スペクトルによる吸光度比の平均値は、前2者のグループより低い値を示し、早材木繊維では1.258、晩材木繊維では1.298 となった。

直径階級IV (D 25-15 μm) の木繊維のリグニン分布：このグループは直径の最大値は前者と変わらないが、最小値が前者より高い。19 樹種の VIS スペクトルによる吸光度比の平均値は、早材では1.069、晩材では1.177 であった。前3者と同様な傾向であるが、その Amax/Amin 比の平均値は前のグループよりも、更に低くなっていた。

直径階級 V (D 30-15 μm) の木繊維のリグニン分布：このグループに分けられた木繊維は、最大径が30 μm に達し、27 樹種があった。VIS スペクトルによる二次壁の Amax/Amin 比は早材の平均値では1.013、晩材の平均値では1.087 であり、前述の I ~ IV の木繊維より更に低い値であった。

直径階級VI (最大径 D>30 μm 以上) の木繊維のリグニン分布：このグループは最大直径30 μm 以上の木繊維である。11 樹種の VIS スペクトルの吸光度比の平均値は、さらに下がり、早材木繊維では0.898、晩材木繊維では0.924 となり、1 より小さかった。即ち、このグループの木繊維二次壁では520 nm 位置のモイレ反応の吸収極大がはっきりしていなかったことを示した。

2) 木繊維直径の差異と GS-リグニンの比率

木繊維の直径階級別吸光度比の平均値をまとめた表は Table 25 で、グラフにすると、Fig. 40 のとおりである。木繊維の直径の増大に伴い、GS-リグニンは G 核の比率が大きくなることが明らかに認められた。

Table 25. The classes of diameter of fibers and the absorption ratio of VIS spectra

Class of diameter of fibers	Number of species	Ratio of VIS absorbance	
		E. F	L. F
I (D<20-10 μm)	11	1.307	1.427
II (D<20-15 μm)	21	1.279	1.349
III (D<25-10 μm)	12	1.258	1.298
IV (D>25-15 μm)	19	1.069	1.177
V (D>30-15 μm)	27	1.013	1.087
VI (D>30-15 μm)	11	0.898	0.924

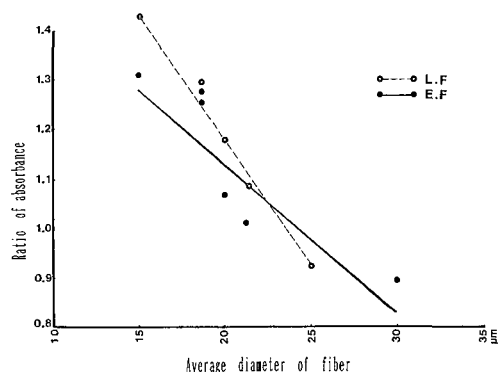


Fig. 40. The relation between the fiber diameter and the ratio of absorbance in VIS-spectra.

ただこの木繊維の直径による分け方は便宜上のものである。即ち、木繊維直径の1年輪内の変動を樹種毎に細かく検討しておらず、それ故木繊維の平均値も求めている。また、測定した細胞の数も少なかった。木繊維の範囲を階級により重複させたのはそのためである。この分け方は視覚的なものを少し前進させたものであるかもしれない。

しかし、この程度の分け方で Fig. 40 に示されているように十分に明かな結果を得られたことは、木繊維の直径とその二次壁リグニンの G・S-リグニンの比率は密接な関係があることを示すものであろう。

4. 道管及び木繊維の壁厚と GS-リグニンの分布

1) 厚壁道管の GS-リグニンの分布

道管壁について、晩材道管壁の厚さが5 μm とそれ以上のものについて調べてみた。全部で17 樹種あったが、7 樹種の熱帯材と亜熱帯材を除いて、10 樹種の晩材道管は VIS スペクトルによる吸光度比値が全部1 より大きかった (Table 26)。即ち、7 樹種の熱帯・亜熱帯材を除外した厚壁の道管は、すべて S-リグニンの比率が比較的高かった。また、それらの早材道管の吸光度比値は、環孔材と半環孔材を除いて、晩材道管と同じ1 より大きかった。

道管の直径から見ると、吸光度比値が1 より大きいものはほぼ中庸なもので、接線径は100 μm 前後のものである。それに対して、吸光度比値が1 より小さい7 樹種の熱帯・亜熱帯材は道管最大接線径が150 μm より大きいものであった。この結果より、道管の GS-リグニンの分布は壁厚と接線径を総合的に考えたほうが適切であると考えられる。

Table 26. The tangential diameter, wall thickness and absorption ratio of VIS spectra in the vessels (thickness>5 μm)

Species	Tangential diameter (μm)	Wall T.		Absorption Ratio	
		E. V	L. V	E. V	L. V
<i>Pouteria grandifolia</i>	31- 88	6.8	6.8	1.166	1.251
<i>Beilschmiedia Linocieroides</i>	88-120	5.0	5.0	1.092	1.075
<i>Pistacia weinmannifolia</i>	41-124	6.8	6.8	1.309	1.379
<i>Chukrasia tabularis</i>	101-145	5.0	5.0	1.063	1.155
<i>Quercus aquifolioides</i>	110-110	5.0	5.0	1.032	1.063
<i>Trigonobalanus doichangensis</i>	104-116	5.0	5.0	1.093	1.060
<i>Lithocarpus dealbatus</i>	130-160	5.0	5.0	1.067	1.094
<i>Diosphyros kaki</i>	120-180	7.0	7.0	1.430	1.249
◆ ring and semi-ring-porous woods :					
<i>Castanopsis delavayi</i>	33-240	5.0	4.0	0.633	1.050
<i>Castanea mollissima</i>	25-215	5.0	5.0	0.664	1.234
◆ tropical and sub-tropical woods :					
<i>Ehretia thyrsoiflora</i>	95- 150	5.0	5.0	0.359	0.461
<i>Stereospermum personatum</i>	104-152	5.4	5.4	0.753	0.753
<i>Dalbergia szemaoensis</i>	90-200	5.0	5.0	0.613	0.602
<i>Dalbergia fusca</i>	101-200	5.5	5.5	0.516	0.516
<i>Gmelina arborea</i>	117-214	5.3	5.3	0.356	0.356
<i>Cassia siamea</i>	162-215	6.4	6.4	0.730	0.730
<i>Erythrina lithosperma</i>	173-290	5.4	5.4	0.383	0.383

※Wall T.: Wall thickness; Absorption ratio: Absorption ratio of VIS spectra;
E. V.: Vessel in the early wood; L. V: Vessel in the late wood.

Table 27. The diameter, wall thickness and absorption ratio of VIS spectra in fibers with thick wall

Species	diameter(μm)	Wall T.		Amax/Amin	
		E. F	L. F	E. F	L. F
<i>Dalbergia szemaoensis</i>	15-20	thick	thick	0.489	1.142
<i>Pouteria grandifolia</i>	15-25	thick	thick	1.330	1.447
<i>Stereospermum personatum</i>	15-20	thick	thick	1.573	1.573
<i>Quercus acutissima</i>	15-30	thick	thick	1.504	1.660
<i>Adina cordifolia</i>	15-20	thick	thick	1.651	1.651
<i>Dipterocarpus turbinatus</i>	15-25	thick	thick	1.715	1.715
<i>Beilschmiedia Linocieroides</i>	15-25	thin to T.	thick	1.648	1.724
<i>Machilus yunnanensis</i>	15-25	thick	thick	1.567	1.763
<i>Fagus longipetiolata</i>	10-20	thick	thick	1.636	1.791
<i>Sorbus thibetica</i>	10-20	thick	thick	1.883	1.883
<i>Liquidambar formosana</i>	10-20	thick	thick	1.391	1.925
◆ tropical woods :					
<i>Baccaurea ramiflora</i>	30-45	thick	thick	0.392	0.392
<i>Dalbergia fusca</i>	15-20	thick	thick	0.588	0.588
<i>Homalium laoticum</i>	20-25	thick	thick	0.604	0.604

※Wall T.: Wall thickness; E. F: Fiber in the early wood; L. F: Fiber in the late wood.
thin to T: thin to thick.

2) 厚壁木繊維のリグニンの分布

木繊維について, “thick” に分けられた厚壁のものは 14 樹種であった。3 樹種の熱帯材を除いて, VIS スペクトルからの Amax/Amin 吸光度比値が全部 1 より大きい, 即ち, GS-リグニンの比率は S 核が多かった (Table 27)。それらの比値は最大 1.925 (*Liquidambar formosana*) で, 最小 1.142 (*Darbergia szemaoensis*) であった。11 樹種の平均値は 1.661 であり, 厚い二次壁を持つ木繊維は S-リグニンを多く含んでいることが考えられる。

5. 要 約

1) 細胞直径の差異と GS-リグニンの比率

100 樹種の広葉樹材の早材道管の直径を 4 級に分け, 吸光度比の平均値を整理した。すべての樹種で 1 より小となり, G-リグニンに富むことを示したが, その比値は大径道管では小さく, 小径道管では高かった。早晚材に分けて, G と S のタイプで表現すると, 道管の径が大きければ, GG タイプのもので, 道管の径が小さければ, SS タイプであった。即ち, GS-リグニンの分布比率に, 道管の直径の増大に従って S 核が減少していく。

101 樹種の木繊維の直径を 6 階級に分け検討した。直径が大きい木繊維は二次壁におけるリグニンの吸光度比は小さかったが, 直径が小さい木繊維はその吸光度比が高かった。即ち, 木繊維は道管と同様に, GS-リグニンの比率は細胞直径の大小と密接

な関係があり, 径が大きいほど, G-リグニンの比率が高いと言える。

2) 厚壁の細胞と S-リグニン

厚壁の道管は薄壁の道管より S-リグニンが多かった。また, 厚壁の木繊維は薄壁の木繊維より S-リグニンの比率が高かった。

VII. 総 合 考 察

1. 広葉樹リグニン分布の不均一性

1) GS-リグニン分布のグループ

本研究は, 広葉樹 GS-リグニンの分布を広葉樹の道管配列, 生育地及び細胞の形態から, 検討したものである。

101 樹種の広葉樹材の GS-リグニン分布を A~E の 5 つのグループに分類した。このリグニン分布のグループ別に道管配列の違いと生育地による違いをまとめてみると, Table 28 のとおりである。

A グループの広葉樹材 (すべての道管, 木繊維が G-リグニンに富むとみなされるもの): 無孔材はこのグループであった。半環孔材 2 樹種と散孔材 21 樹種が含まれたが, 環孔材と放射孔材はなかった。

生育地からみると, 冷温帯材はなく, 温帯材では無孔材 1 種及び *Populus* 属の 1 種であった。残りは熱帯材の 20 樹種と亜熱帯材の 2 樹種であった。亜熱帯材 2 樹種のうち, 1 種は *Callicarpa arborea* で, それと同属で熱帯産の *C. poilanei* も A グループに属している。もう 1 種の *Gynocardia odorata*

Table 28. The relation of GS-lignin distribution in different groups to habitat and porosity form in 101 Yunnan hardwoods

	A-group	B-group	C-group	D-group	E-group
	No./Total	No./Total	No./Total	No./Total	No./Total
Porosity :					
Vessel-less	1/ 1	—	—	—	—
Ring-porous	—	—	—	9/ 9	—
Radial-porous	—	—	—	—	4/ 4
Semi-ring-porous	2/10	2/10	3/10	3/10	—
Diffuse-porous	21/77	4/77	30/77	2/77	20/77
Habitat :					
Cold-temperate	—	—	6/11	1/11	4/11
Temperate	2/24	1/24	6/24	9/24	6/24
Sub-tropical	2/18	4/18	6/18	2/18	4/18
Tropical	20/48	1/48	15/48	2/48	10/48

※No. : The number of species.

Total : Total species.

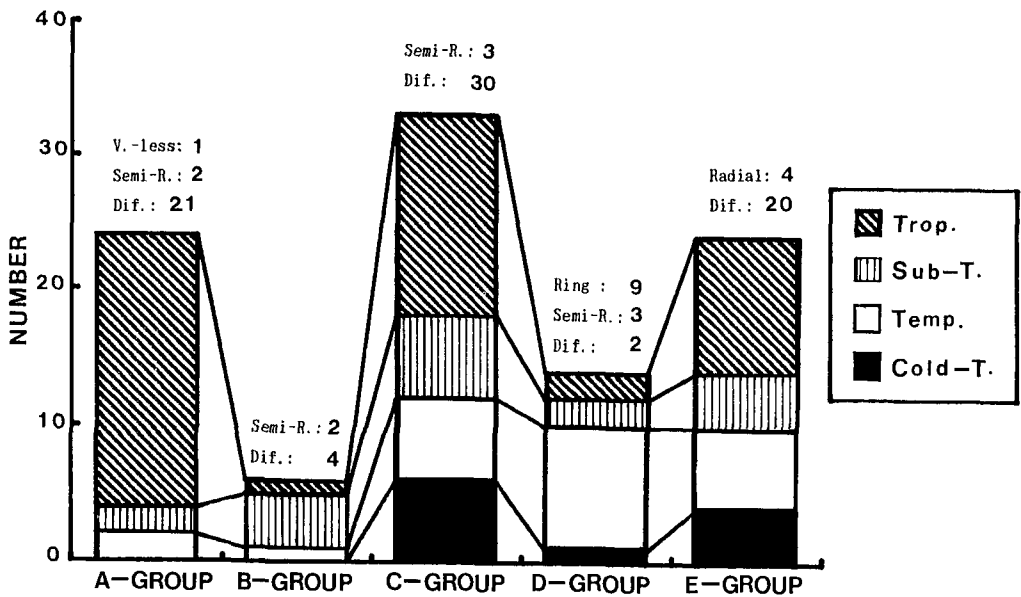


Fig. 41. The GS-lignin distribution groups in relation to tree habitat and porosity form in 101 Yunnan hardwoods..

は亜熱帯に生育しているが、生長輪も観察されなくて、熱帯材と似ている樹種である。即ち、*Populus* のような特殊のものを除いて、本研究ではこのようなリグニン分布は熱帯材だけに現れた。

Bグループの広葉樹材（晩材木繊維のみS-リグニンに富むとみなされるもの）：Bグループのものは、6樹種しかなかった。5グループのうちで樹種数が最も少ないグループとなった。それらは、半環孔材と散孔材で、また、ほとんど温帯と熱帯の中間の亜熱帯に生育しているものである。

Cグループの広葉樹材（道管はG-リグニンに富み、木繊維はS-リグニンに富むとみなされるもの）：このグループの広葉樹は、半環孔材と散孔材のものであるが、半環孔材は2樹種だけであり、ほとんどのものは散孔材であった。生育地を調べると、冷温帯から熱帯まですべての生育地をわたっている。その占有率は冷温帯材は55%、温帯材は25%、亜熱帯材は33%、熱帯材は31%で、冷温帯のものが最も多かった。温帯のものはこの数字からみると、多くないが、その原因は24種の温帯材の中、散孔材の占める率が少なかったためとみられる。

Dグループの広葉樹（早材道管のみG-リグニンに富み、他はS-リグニンに富むとみなされるもの）：

Dグループは14樹種あるが、9種の環孔材と、環孔材と類似した道管配列をもつ3種の半環孔材及び大・小径道管の差が大きい2種の散孔材であった。すなわち、Dグループは環孔材と、早・晩材道管の径が大きい差を持つ樹種だけであった。また、温帯材は9樹種で、65%を占めている。

Eグループの広葉樹材（すべての道管、木繊維がS-リグニンに富むとみなされるもの）：このグループの広葉樹材はすべての放射孔材の4樹種及び散孔材の20樹種であった。生育地を調べると、冷温帯材は4、温帯材は6、亜熱帯材は4、熱帯材は10樹種で、各生育地樹種のそれぞれ36%、25%、22%と21%を占め、ほぼ平均的に各生育地に分布していた。

2) GS-リグニン分布の特徴

Fig. 41はGS-リグニン分布グループごとに生育地と管孔配列についてまとめたグラフである。このグラフから次のことが示唆された。

木部組織が異なることによって広葉樹リグニンのG/S構成比率が異なった。本研究の実験結果ではA、C、E3つのグループの樹種数が多かった。これらのグループでは、早・晩材と関係なく、道管と木繊維の組織別のGS-リグニン分布の差である。即ち、GS-リグニン分布の変動は、道管か木繊維か

の組織の差異が最も重要な分かれ目となる。

さらに、A、C、E の 3 つのグループの中で、最大の樹種数を持つグループは C グループである。C グループは道管では G-リグニンに富み、木繊維では S-リグニンに富むグループである。広葉樹リグニン分布型はいろいろあるが、この分布型が最も一般的なものと考えられる。

B グループと D グループの樹種数が少なかった。さらに、B グループの数が最も少なかった。このことは木繊維の GS-リグニン分布は一年輪内で変動があるけれども、早材では G 核が多く、晩材では S 核が多いというような激しい変動は少ないことを示しており、木繊維のリグニン分布はほとんど S-リグニンの比率が高い分布型であることを示唆している。また、G-リグニンに富む木繊維を持つ広葉樹材はほぼ熱帯材だけに起こるもので、一部の熱帯材を除いて、広葉樹材木繊維二次壁のリグニン分布は S 核の比率が高いと言えよう。

C、D、E 3 つのグループを足してみると、供試材数の大半を占める。この C、D、E のグループは木繊維は全部 S-リグニンに富むとみなされるものである。しかし、道管の GS-リグニンの分布が G 核が多いものから S 核が多いものまで大きな範囲で変動している。即ち、道管二次壁の GS-リグニン分布の変動は広葉樹リグニン分布の不均一性の大きな原因と考えられる。さらに、この 3 つのグループで道管二次壁のリグニン分布を調べた。C グループの大部分は散孔材で、D グループのものはほとんどは環孔材で、E グループのものは放射孔材の全部を含んでいる。即ち、この 3 つのグループのリグニン分布が現れたのはそれらの道管配列から由来するものと推測できる。

2. GS-リグニンの不均一性

既に述べたように、一部の熱帯材は道管、木繊維ともに G-リグニンに富んでいた。しかし、その現象は冷温帯と温帯材には（無孔材とポプラを除いて）出現しなかった。その原因については次の 2 つを推測してみた。

1) 生育地域による成長周期の有無

春夏秋冬の季節が鮮明に分けられる冷温帯と温帯は、気温や降水がほぼ季節に制御され、樹木の生長活動は季節によって異なる。春になると、水分と養分を大量に運搬するために、道管は先に発達して、その細胞の二次壁の形成と木化は突発的にかつ急激

的に進む^{59,67)}。季節の変化につれ、生長が隆盛に達した後、早材から晩材へ、道管では徐々に径が減少し、数が少なくなる。壁厚が増える樹種もある。木繊維では道管と機能が違うので、径の変化が小さく、壁厚の増加は道管のように顕著でない。

一方、雨量が豊富で、日照が充足している熱帯に生育する樹木は、まず、季節の変化につれて生長活動の周期がはっきりしない。早・晩材は分けられないものが多い。水分の運搬はいつでも同じなので、温帯材のように夏や秋には道管の径や数などを減少する必要はない。

深沢・高部⁵⁶⁾は温帯産広葉樹ブナのリグニン分布の周期性を報告し、1 年輪内で、道管では早材部において多量の G-リグニンが堆積し、S-リグニンは僅かであり、晩材への移行とともに、G-リグニンの堆積量が減少し、代わって、S-リグニンの堆積量が増えてくるとしている。木繊維では早材部 S-リグニンに富み、少量ながら G-リグニンを含んでいるが、晩材部では殆ど S-リグニンであると解釈した。このリグニン分布の変動の周期性は温帯材の 1 年の生長の周期性と合致している。しかし、熱帯材はこの生長の周期性がはっきりしていないので、GS-リグニン分布も温帯産広葉樹材と異なっている。

2) 熱帯樹の早生性とリグニンの生合成経路

熱帯材の *Anthocephalus chinensis* は有名な早生樹である。その他、A グループに分かれた *Duabanga grandiflora*, *Erythrina lithosperma*, *Erythrina arborescens*, *Bombax ceiba*, *Pterocarya tonkinensis*, *Gmelina arborea* など有名な早生樹である^{68,69,70)}。

Terashima³⁵⁾は HGS-リグニンの生合成経路についての仮説を発表した。それによると、木化の初期には、二次壁の S₁ 層にはまず H-リグニンが堆積、次に一定の量の G-リグニンを合成し二次壁の全体に堆積する。細胞壁の木化の進行に従って、二次壁の残った場所に S-リグニンが堆積すると主張した。

高部・深沢⁵⁶⁾はコブシの木化進行過程でのリグニン分布を調べ、木繊維二次壁に供給されるモノリグノールが木化初期には G 核に富み、木化の進行とともに S 核に富んできた結果を報告した。

樋口ら^{6-8,71)}のリグニン生合成経路の研究によると、フェルラ酸の生合成までは裸子・被子植物で共

通であるが、その後、フェルラ酸-5-ヒドロキシラーゼと OMT(o-メチルトランスフェラーゼ)の異質特異性がG-リグニンとS-リグニンの形成を制御している。このフェルラ酸-5-ヒドロキシラーゼの酵素活性はS-リグニン生成の制限因子となっている。H-リグニンからG-リグニン、G-リグニンからS-リグニンは一定の生合成経路を通して、また、酵素の作用によって行われる。

生長が非常に早い熱帯の早生樹では、その酵素の活性周期の変調が考えられる。G-リグニンが合成、堆積した後、S-リグニンの合成に酵素が間に合わないか、またはS-リグニン生合成の経路に入れないで、そのままリグニンを形成していき、結果として、S/Gの分布比率にS-リグニンが少なくなる。言い替えると、G-リグニンの比率が多くなったとも考えられる。

川村ら⁷²⁾は生長が極めて早く、非常に薄い細胞壁を持っている *Erythrina* 属の材のリグニン分布について報告している。彼らの結論は、クラソン・リグニン含有量は著しく高く、ニトロベンゼン酸化によるS/V比は普通の温帯広葉樹材より例外的に低かった。また、IR、NMRによる分析結果も *Erythrina* は広葉樹材でありながら、針葉樹材に近いリグニン分布を示した。本研究の結果と一致している。

しかし、本研究では熱帯産供試材のうち、15樹種はCグループのリグニン分布を持っている。同じ熱帯材なのになぜAグループとCグループに入っているか考えてみた。

熱帯の樹木は、年間の生長の休止が見られないものがたくさんあるが、雲南の一部の熱帯樹木は、熱帯季節風降雨林に生育しているため、乾季と雨季が明らかに区分でき、落葉する樹種もあり、顕著な季節相を形成している。このような熱帯材は温帯材のように、生長が早い時期と遅い時期、その上に、生長の休止期もあると推測される。Cグループのうち、落葉樹は *Stereospermum personatum*, *Anogeissus acuminata* であり、半落葉樹は *Cassia siamea*, *Albizia lucidior*, *Garuga Pinnata* である。また、*Trema orientalis*, *Morus macroura*, *Ulmus lanceaefolia*, *Dipterocarpus turbinatus*, *Pterospermum lanceaefolium* などその季節風降雨林中に生育している²⁾。そのために、このグループの材では生長輪が明瞭なものとはほぼ明瞭なものは

70%を占め、ある程度の早晩材の区別が見られた。

即ち、このような熱帯材の生長は温帯材とある程度似ている。一般の温帯広葉樹リグニンの分布で、道管ではG-リグニンが多く、木繊維ではS-リグニンが多くなったのはこの生長の盛衰によるものと考ええるなら、季節風降雨林の雨季と乾季の生長が違う熱帯樹木は、Cグループのリグニン分布を持つのは不思議なことではない。

3. 広葉樹リグニン分布の不均一性と樹木進化

1) 道管・木繊維の機能分担とリグニン分布

既に述べたように、樹木が広葉樹に進化する過程で、仮道管は主に水分運搬の道管要素と主に樹体を支える木繊維に分化した。その分化と同時に、G-リグニンのほか、S-リグニンが出現した。すなわち、樹木細胞機能の分化と平行して、組織化学成分のリグニンはGS-リグニンのように構成成分が複雑になった。道管二次壁ではG核が比較的に多いが、木繊維の二次壁ではS核が比較的多いリグニン分布型を持つ広葉樹種は最も多かった。

樹木の生長において、道管が先に木化すること、即ち、他の細胞ができる前に、水分と養分を運搬する器官をつくるのが優先される。道管要素は、原始的なものでは細くて長く、壁に階段壁孔と階段せん孔を持っている。進化したものでは短く径が大きく、せん孔も単せん孔であり、また、通導の安全性を高めるために多くの道管の集まった集団管孔である。このような進化は、短期間に大量の水分を運搬する効率のためと推測される。周知のように、環孔材は散孔材より進化している広葉樹と考えられている。散孔材のやや平均的に分散している道管は、春の集中大量の水分を通導する働きに対応する点では、環孔材のように速く完成する径の大きい孔圏道管より劣っている。即ち、環孔材の進化は水分の通導を分担する道管が役割に適するような形になったことによると考えられる。一方、環孔材の晩材の小径道管が厚壁の木繊維のようになるものがあるのは、負圧に耐え、水分運搬の安全性を高める役割がある一方、樹体を支える木繊維の機能に引きずられてきたとも推測している。晩材小径道管のGS-リグニン分布の比率にS核が多くなったのは、この機能の変化のためと推測できる。

既に第VI章で示したように、GS-リグニン分布の変動は道管、木繊維の直径及び壁厚と関連している。径が大きい薄壁の道管は、GS-リグニンにG

核の比率が高くなった。この原因は前述したリグニン生合成の経路から解釈すると、径が大きい道管の木化は速いので、H・G・S-リグニンの順序で形成、二次壁に堆積するリグニンは、HとGを堆積してからあと、S-リグニンを形成する酵素が間に合わないか、あるいはS-リグニンが生合成の経路に入らなかったためであろうか。また、壁が薄いので、HとG-リグニンが堆積した後、大部分の壁は既に堆積され、空いている場所が少なくなる。続くS-リグニンの堆積は困難となり、堆積量は少ないとも考えられる。厚い壁を持つ細胞にS-リグニンが多く含まれるのは、この理由の逆の解釈であろう。

木繊維は主に樹体を支える機能を分担するため、道管より木化が遅い。H・G・S-リグニンの堆積順序のために、木繊維二次壁におけるGS-リグニンの比率にS-リグニンが高くなった。このことが早材より晩材のほうがS核に富んでいた理由であると考えられる。

即ち、GS-リグニンの分布の変動は、道管と木繊維の分担機能の進化によって生じたと考えられる。

2) 気候・環境の変化とリグニン分布

植物の進化は生活の環境が水中から陸上へ、暑いところから寒いところへの変化とよく関連している⁷³⁾。

本研究では熱帯から冷温帯までの101樹種のGS-リグニンの分布を調べた。その結果、熱帯に生育する樹種はG-リグニンが多いAグループのものが最も多かった。亜熱帯のものはBグループのものが多かった。温帯材はC・D・Eのリグニン分布が多かった。冷温帯になると、C・Eグループのものは多く、そのうち、Eのほうがもっと多かった。これは、実験された樹種数だけの統計で、もっと多くの実験材料で追加する必要があるが、熱帯から冷温帯への生育気候の変化に従って、AグループからEグループへ変化する傾向、すなわち、S-リグニンの比率が多くなっていく傾向が認められた。

S-リグニンの出現は針葉樹から広葉樹に進化した結果である。このようにGS-リグニン分布の変動は、無孔材から環孔材までの構造上の進化とよく関連すること、樹木の気候変化の対応とよく関連すること、また樹木の組織の機能分担とよく関連することから、このことは樹木の進化とよく関連すると言える。

謝辞：最後に、本研究の遂行から論文作成にわたり、北海道大学農学部教授深沢和三博士には終始懇切な御指導、教示を賜った。同助教授大谷 諄博士には、研究の遂行、論文の作成にあたって多くの御教示と助言を賜った。同教授寺沢 実博士、同教授笹谷宜志博士には、論文の取りまとめに際し、多くの御教示を賜った。

研究の実施上、同助手の船田 良博士、小島康夫博士、佐野雄三氏、京都大学の高部圭司博士から、また、前川悦子氏並びに大学院生の諸氏から、多くのご助言と激励、実験の指導及び協力を頂いた。

研究試料の入手に際し、中国科学院昆明植物研究所唐 曜博士、同雲南熱帯植物研究所副教授鄒寿青氏、西南林学院副教授肖紹瓊氏、副教授何培緒氏、雲南省林業科学院高級工程師羅良才氏から、試料の採集及び材鑑の提供などの御協力、教示を受けた。

以上の各位に対し、深甚なる謝意を表します。

文 献

1. 呉征鎰：雲南種子植物名録，上，下，1-2259. 雲南人民出版社，昆明，1984
2. 呉征鎰主編：雲南の植物 I，1-482. II，1-530. III，1-521. 日本 NHK 出版社，雲南人民出版社，1985
3. 羅良才：雲南經濟木材誌，1-452. 雲南人民出版社，昆明，1989
4. 原口隆英ら：木材の化学，1-288. 文永堂，東京，1985
5. 西田 誠編：系統と進化，1-258. 東海大学出版会，東京，1983
6. 樋口隆昌：広葉樹リグニンの化学，木材研究資料，7：1-17. 1973
7. 樋口隆昌：リグニンの生合成，化学と生物，206-214. 1975
8. 樋口隆昌：植物の進化を探るリグニンの化学. 化学，28(3)：32-39. 1975
9. KOSIKOVA, B., ZAKUTNA, L. and JONIAK, D.: Investigation of the lignin-saccharidic complex by electron microscopy. *Holzforschung*, **32**: 15. 1978
10. FERGUS, B. J. and GORING, D. A. I.: The top-chemistry of delignification in kraft and neutral sulphite pulping of birch wood. *Pulp Paper Mag. Can.*, **70**: T-314. 1969
11. FERGUS, B. J. and GORING, D. A. I.: The location of guaiacyl and syringyl lignins in birch

- xylem tissue. *Holzforschung*, **24**: 113-117. 1970
12. FERGUS, B. J. and GORING, D. A. I.: The distribution of lignin in birch woods determined by ultraviolet microscopy. *Holzforschung*, **24**: 118-124. 1970
 13. MUSHA, Y. and GORING, D. A. I.: Distribution of syringyl and guaiacyl moieties in hardwoods as indicated by ultraviolet microscopy. *Wood Sci. Technol.*, **9**: 45-58. 1975
 14. MUSHA, Y. and GORING, D. A. I.: Cell dimensions and their relationship to the chemical nature of the lignin from the wood of broad-leaved trees. *Can. J. For. Res*, **5**: 259-268.
 15. SARKANEN, K. V., CHANG, H.-M. and ERICSSON, B.: Species variation in lignin. 1. Infra-red spectra of guaiacyl and syringyl models. *Tappi.*, **50**(11): 572-575. 1967
 16. SARKANEN, K. V., CHANG, H.-M. and ALLAN, G. G.: Species variation in lignin. 2. Conifer lignin. *Tappi.*, **50**(12): 583-587. 1967
 17. SARKANEN, K. V., CHANG, H.-M. and ALLAN, G. G.: Species variation in lignin. 3. Hardwood lignin. *Tappi.*, **50**(12): 587-590. 1967
 18. SAKA, S. and GORING, D. A. I.: The distribution of lignin in white birch wood as determined by bromination with TEM-EDXA. *Holzforschung*, **42**: 149-153. 1988
 19. ERIKSSON, L., LIDBRANDT, O. and WESTERMARK, U.: Lignin distribution in birch (*Betula verrucosa*) as determined by mercurization with SEM- and TEM-EDXA. *Wood Sci. Technol.*, **22**: 251-257. 1988
 20. HARDELL, H.-L., LEARY, G. I., STOLL, M. and WESTERMARK, U.: Variations in lignin structure in defined morphological parts of birch. *Sven. Papperstidn.*, **83**: 44-49. 1980
 21. KOLAR, J. J., LINDGREN, B. O. and ROY, T. K.: About the distribution of syringyl and guaiacyl residues in birch lignin. *Cell. Chem. Technol.*, **13**: 491-499. 1979
 22. FUJII, T., SHIMIZU, K. and YAMAGUCHI, A.: Enzymatic saccharification on ultrathin sections and ultraviolet spectra of Japanese hardwoods and softwoods. *Mokuzai Gakkaishi*, **33**(5): 400-404. 1987
 23. 川村一次, 樋口隆昌: 様々な植物より得られるリグニンの性質に関する研究(第1報)紫外線吸収曲線について. 木材学会誌, **9**(5): 182-188. 1963
 24. 川村一次, 樋口隆昌: 様々な植物より得られるリグニンの性質に関する研究(第2報)赤外線吸収曲線について. 木材学会誌, **10**(5): 200-206. 1964
 25. 川村一次, 樋口隆昌: 様々な植物より得られるリグニンの性質に関する研究(第3報)呈色反応, メトキシ基含有率及びニトロベンゼン酸化による生成アルデバイド類について. 木材学会誌, **11**(1): 19-22. 1965
 26. WU, J., FUKAZAWA, K. and OHTANI, J.: Lignin analysis in some tropical hardwoods using ultraviolet microscopy. *Res. Bull. Exp. For. Hokkaido Univ.*, **47**: 353-386. 1990
 27. WU, J., FUKAZAWA, K. and OHTANI, J.: Distribution of syringyl and guaiacyl lignins in hardwoods in relation to habitat and porosity form in wood *Holzforschung*, **46**: 181-185. 1992
 28. SMITH, D. C. C.: p-Hydroxybenzoate groups in the lignin of aspen (*Populus tremula*). *J. chem. Soc.*, 2347-2351. 1955
 29. PEARL, I. A. and BUSCHE, L. R.: Studies on the chemistry of aspen-wood. VI. The Klason lignin determination as applied to aspenwood with special reference to acidsoluble lignin. *Tappi*, **43**: 961-970. 1960
 30. 川村一次, 樋口隆昌: 木材幼組織のリグニン(第1報)ニセアカシアのリグニン. 木材学会誌, **9**(6): 148-152. 1963
 31. FUKAZAWA, K. and IMAGAWA, H.: Quantitative analysis of lignin using an UV microscopic image analyzer. Variation within one growth increment. *Wood Sci. Technol.*, **15**: 45-55. 1981
 32. TAKANO, K., FUKAZAWA, K. and ISHIDA, S.: Within a ring variation of lignin in *Picea glehnii* by UV microscopic image analysis. *Res. Bull. Exp. For. Hokkaido Univ.*, **40**: 709-722. 1983
 33. 高部圭司, 深沢和三: 細胞壁の化学成分分布の周期性. 第34回リグニン討論会講演要旨集, 70-80. 1989
 34. TAKABE, K., MIYAUCHI, S., TSUNODA, R. and FUKAZAWA, K.: Distribution of syringyl and guaiacyl lignins in Japanese beech (*Fagus crenata*). Variation within an annual ring. *IWA Bull. n. s.*, **13**(1): 105-112. 1992
 35. TERASHIMA, N.: A new mechanism for formation of a structurally ordered protolignin macromolecule in the cell wall of tree xylem. *J. Pulp Pap. Sci.*, **16**: J 150-155. 1990
 36. 高部圭司, 深沢和三, 寺島典二, 福島和彦: 紫外

- 線顕微分光法による広葉樹木部構成要素の木化過程の検討. 第 32 回リグニン討論会講演要旨集, 1-4. 1987
37. 吳 晋, 大谷 諄, 深沢和三: 雲南産主要広葉樹材の道管壁修飾構造の SEM 研究. 北海道大学農学部演習林研究報告, **46**(4): 847-939. 1989
 38. WU, J., OHTANI, J. and FUKAZAWA, K.: SEM observation on vestured pits in some Yunnan hardwoods., *Res. Bull. Exp. For. Hokkaido Univ.*, **45**(3): 789-809. 1988
 39. 深沢和三: 顕微分光による細胞壁の検索. 木材学会誌, **34**(8): 641-646. 1988
 40. 雲南熱帯植物研究所編集: 西双版纳植物名録, 1-507. 雲南民族出版社, 昆明, 1984
 41. 鄭万鈞: 中国樹木誌, 第一巻, 第二巻, 中国林業出版社, 1-2398. 北京, 1983
 42. 須藤彰司: 南洋材, 地球出版(株), 東京, 1970
 43. 中野準三, 樋口隆昌, 住本昌之, 石津 敦: 木材化学 1-346, ユニ出版, 東京, 1983
 44. 寺島典三: リグニン化学における標識実験法. 第 36 回リグニン討論会講演集, 81-87. 1991
 45. 右田伸彦, 米沢保正, 近藤民雄: 木材化学, 上巻, 317-342. 共立出版株式会社, 東京, 1968
 46. AULIN-ERDTMAN, G.: Spectrographic contribution to lignin chemistry III. Investigations on model compounds. *Sven. Papperstidn.*, **56**: 91-101. 1953
 47. PEW, J.C.: Biphenyl group in lignin. *Nature*, **193**: 250-252. 1962
 48. LANG, P.G.: The distribution of lignin in the cell wall of normal and reaction wood from spruce and a few hardwoods. *Sven. Papperstidn.* **57**: 525-532.
 49. WARDROP, A.B.: The phase of lignification in the differentiation of wood fibers. *Tappi.*, **40**: 225-243. 1957
 50. WERGIN, W.: Über entstehung und Aufbau von Reaktions holzzellen 4 Nachweise der Ligninverteilung in den Zellwänden des druckholzes durch Untersuchungen in UV-Licht. *Flora*, **156**: 322-331. 1965
 51. 飯塚亮介, 中野準三: リグニンの呈色反応機構に関する研究 (第 11 報) Mäule 反応の呈色機構(7). 木材学会誌, **23**(5): 232-236. 1977
 52. 飯塚亮介, 中野準三: リグニンの呈色反応機構に関する研究 (第 12 報) Mäule 反応の呈色機構(8). 木材学会誌, **24**(8): 563-568. 1978
 53. MESHITSUKA, G. and NAKANO, J.: Studies on the mechanism of lignin color reaction. Mäule color reaction(9). *Mokuzai Gakkaishi*, **27**(2): 111-115. 1981
 54. LIYAMA, K. and PANT, R.: The mechanism of Mäule colour reaction introduction of methylated syringyl nuclei into softwood lignin. *Wood Sci. Technol.*, **22**: 167-175. 1988
 55. 中野準三: リグニンの化学, 20-36. ユニ広報(株), 東京, 1979
 56. 深沢和三: 顕微分光法による木材成分の生成及び分解過程の組織化学の研究, 研究成果報告書, 1-209. 北海道大学農学部, 1990
 57. SRIVASTAVA, L. M.: Histochemical studies on lignin. *Tappi.*, **49**(4): 173-183. 1966
 58. 唐 曜: 雲南熱帯及亜熱帯材, 1-269. 科学出版社, 北京, 1973
 59. 今川一志, 石田茂雄: 樹木の木部形成に関する研究. 北海道大学農学部演習林研究報告, **29**(1): 55-72. 1972
 60. 吉永 新, 藤田 稔, 佐伯 浩: モイレ反応と顕微分光測光法によるリグニン多様性の検討. 京都大学農学部演習林報告, **61**: 276-284. 1989
 61. YOSHINAGA, A., FUJITA, M. and SAIKI, H.: Relationships between cell evolution and lignin structural varieties in oak xylem evaluated by microscopic spectrophotometry with separated cell walls. *Mokuzai Gakkaishi*, **38**(7): 629-637. 1992
 62. 荻山弘一, 谷口栄一: 南洋材リグニンの特性について(1). 紙パ技協誌, **25**(10): 494-498. 1971
 63. 荻山弘一, 安江保民: 南洋材リグニンの特性について(2)ラワン材から得られる 1% NaOH 易溶性リグニン質の分離と抽出成分の関係. 紙パ技協誌, **27**(9): 441-448. 1973
 64. KAWAMURA, I. and HIGUCHI, T.: Comparative studies of milled wood lignins from different taxonomical origins by infrared spectroscopy. In: *Chimie et biochimie de la lignine, de la cellulose et des hemicelluloses. Symp. Int. Grenoble*, 439-456. 1964
 65. KAWAMURA, I. and BLAND, D.E.: The lignins of Eucalyptus wood from tropical and temperate zones. *Holzforschung*, **21**(3): 65-75. 1967
 66. IAWA Committee: List of Microscopic Features For Hardwood Identification., *IAWA Bull. n. s.*, **10**(3): 219-332. 1989
 67. ESAU, K.: Plant Anatomy, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., 1953
 68. 成俊卿: 木材学, 1-1379. 中国林業出版社, 北京, 1985

69. 成俊卿: 中国熱帯及亜熱帯材, 1-621. 科学出版社, 北京, 1980
70. 鄒寿青, 張景良, 吳達期, 劉建華: 西双版纳主要木材, 1-184, 中国林業出版社, 北京, 1989
71. 樋口隆昌: 植物細胞の接着剤リグニンの生合成と分解機構. 現代化学, **10**: 14-19. 1992
72. 川村一次, 篠田善彦, トランバンアイ, 棚田敏秀: デイゴ属 *Erythrina* 材リグニンの化学性質について. 木材学会誌, **23**(8): 400-404. 1977
73. 前川文夫: 植物の進化を探る, 1-204. 岩波書店, 東京, 1971

Summary

The present study was undertaken to investigate the distribution of syringyl(S) and guaiacyl(G) lignin in vessels and fibers of hardwoods, to develop a new methods for estimating the ratio of S- to G-lignin, and elucidate the variation in GS-lignin ratios in relation to habitats, porosity form and cell dimension of hardwoods.

In the present study, 101 species in 91 genera and 49 families from Yunnan, southern China were examined, occurring in cold-temperate, temperate, sub-tropical and tropical habitats. The ratio of G- to S-lignin was estimated by ultraviolet(UV) and visible light(VIS) microspectrophotometry with the Mäule treatment. The G/S ratio of hardwoods may be variable, but generally more G-lignin is found in vessels and more S-lignin in fibers. Measurement of the G/S ratio is difficult by the UV absorption spectra of lignin, because the absorption maximum values are very close to each other between S- and G-units. However, experiments were carried out by VIS-spectra after Mäule color reaction and Wiesner color reaction to investigate the variation in lignin distribution. We also tried to make a numerical expression of the spectra for estimating G/S ratio.

The UV and VIS microspectrophotometry resulted as follows: 1). The distribution of S- and G-lignin showed a distinct difference between vessels and fibers in hardwoods. The basic pattern was G-lignin rich in vessels and S- lignin rich in fibers. 2). The lignin in large vessels of early wood was predominantly G-lignin, but that in small vessels from late wood was rich in S-lignin in the ring-porous woods. In vessels of radial-porous woods, both of early and late woods contained large amounts of

S-lignin. Moreover, the lignin in the vessel-less wood was mostly G-lignin as in softwood. 3). The GS-lignin distribution was changed with the growth environment. Both of vessels and fibers in tropical woods showed abundant amounts of G-lignin, because tropical trees grow too fast to lose growth circle. 4). The GS-lignin distribution is closely related to the dimensions of vessels and fibers. It was recognized that the larger the tangential diameter of cells, the less the amount of S-lignin was, while, the more the cell wall thickness, the more S-lignin was.

The results revealed that the S-lignin of hardwoods showed a tendency to increase gradually in company with the change in function from water conduction to mechanical support in vessels and fibers of hardwoods, and also with tropical to cold-temperate conditions. Therefore, we have concluded that the variation and difference in G/S ratio among cells or trees have evolutionary significance.