

2・2 通 気 特 性

金 川 靖

Permeability

Yasushi KANAGAWA

2・2・1 はじめに

スラウェシー産材の通気特性について検討した。通気特性は木材中での物質の通導性を表わす指標であり、直接的には防腐剤等液剤の浸透・注入の難易を示すものである。また、近年に於いては、木材の染色・調色の必要性が高まり、また、木材の化学的改質への関心が強くなっている。これらの処理もすべて染料やポリマー、モノマーの木材中への浸透性によってその処理の難易が決まる。さらに、実用的な面では、木材の人工乾燥、特に、減圧乾燥においては、木材中の水蒸気をいかに早く材外に排出するかによってその効率は大幅に変わるが、これは乾燥条件や操作よりもその材の通気性に支配される¹⁾。以上のように通気特性は実用的な各種の加工処理の難易を示す重要な指標である。

木材の通気性は、その通導方向によって著しい差があり、繊維方向の通気性が高い木材では、繊維直角方向の数万倍の通気性を示す場合もある。また、通気性は木材の組織構造と密接な関係がある。特に広葉樹材繊維方向の通気性は道管内のチロース等の内容物の有無や存在状態によって著しい差があり、通気性の高いアピトン辺材は通気性の低いダークレッドメランチ心材の約10万倍にも達し、木材の諸性質の中でもこれ程の差は電気抵抗などで極く希れにみられるだけである。

本報告では、スラウェシー産40樹種（うち針葉樹1樹種）の心材の通気係数を、また大半の樹種についてはさらに樹幹内半径方向各部位での通気係数を減圧法によって求めた。道管内の内容物との関連を明らかにすると共に、その内容物が存在する場合の通気経路について蛍光色素希薄水溶液の通導部分の蛍光観察から検討した。通気係数を試験片内の平均圧力を変化させてDarcy則によって表わした後、Klinkenberg式によって粘性流のみによる真の通気係数と分子流の寄与の程度を求めた。

2・2・2 測定方法

供試樹種は表1に示す40樹種を用いた。これらは、強度特性²⁾や収縮特性³⁾を調べたものと同じの個体を用いている。

厚さ45mmの柁目板を天然乾燥によって気乾状態にした後、繊維方向10cm、木口面直径3cmの円柱形試験片を樹心から辺材部にわたって4～6個作製し、繊維方向の通気係数の測定に供した。繊維方向長さによって通気係数は変化する⁴⁾⁵⁾が、針葉樹・広葉樹共に10cm程度で長さに関係せず一定の値が得られる⁶⁾。

測定は図1に示す測定装置によって行なった。測定温度は $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ である。繊維方向の定常状態の通気係数は円柱形試験片の一端を真空ポンプと減圧度調整器で常圧以下の一定圧力に保ったときの試験片両端の圧力差と流量からDarcy則によって、種々の平均圧力の下でのみかけの通気係

Table 1. Permeability Properties of Sulawesi Wood.

Family	Genus	Sap			Heart			Contents in Vessel
		ρ	K_o	b	ρ	K_o	b	
<i>Anacardiaceae</i>	<i>Dracontomelon</i> sp.	—	1.10×10^2	—	0.59	9.00×10^{-3}	—	c
"	<i>Koordersiodendron</i> sp. (1)	0.81	6.07×10^1	5.47×10^{-3}	0.58	2.80×10^{-3}	1.12×10^0	c
"	<i>Spondias</i> sp.	—	—	—	0.47	5.20×10^1	—	a
<i>Burseraceae</i>	<i>Canarium</i> sp. (1)	—	—	—	0.55	9.90×10^{-3}	—	c
"	<i>Canarium</i> sp. (2)	0.61	4.23×10^1	7.19×10^{-3}	0.61	3.21×10^{-1}	1.33×10^{-1}	c
"	<i>Santiria</i> sp. (1)	—	—	—	0.47	1.10×10^{-2}	—	c
"	<i>Santiria</i> sp. (2)	—	—	—	0.61	3.80×10^{-3}	—	c
<i>Celastraceae</i>	<i>Lophopetalum</i> sp.	0.55	2.83×10^1	5.76×10^{-3}	0.48	1.31×10^1	9.40×10^{-3}	a
<i>Combretaceae</i>	<i>Terminalia</i> sp. (1)	—	—	—	0.50	5.70×10^{-1}	—	a
"	" (2)	—	—	—	0.46	9.40×10^{-1}	—	a
"	" (3)	—	—	—	0.70	9.50×10^{-1}	—	c
"	" (4)	0.76	4.25×10^1	1.08×10^{-2}	0.73	4.06×10^{-1}	3.52×10^{-2}	a
<i>Datiaceae</i>	<i>Octomeles</i> sp.	0.39	1.38×10^2	6.21×10^{-3}	0.34	5.90×10^{-2}	1.06×10^{-1}	c
<i>Euphorbiaceae</i>	<i>Sapium</i> sp. (1)	—	—	—	0.39	2.00×10^1	—	a
<i>Gonystylaceae</i>	<i>Gonystylus</i> sp.	0.57	1.62×10^1	5.48×10^{-3}	0.55	8.30×10^{-1}	1.43×10^{-1}	b
<i>Guttiferae</i>	<i>Calophyllum</i> sp. (1)	0.56	1.12×10^2	6.19×10^{-3}	0.46	3.23×10^{-1}	5.73×10^{-2}	c
<i>Lauraceae</i>	<i>Litsea</i> sp. (1)	—	4.90×10^1	—	0.42	6.50×10^{-3}	—	c
"	" (2)	—	—	—	0.49	1.60×10^{-2}	—	c
"	" (3)	0.52	3.79×10^0	3.85×10^{-2}	0.51	8.20×10^{-3}	9.66×10^{-1}	c
<i>Meliaceae</i>	<i>Aglaia</i> sp. (1)	—	9.20×10^0	—	0.58	4.80×10^{-2}	—	b
"	<i>Dysoxylum</i> sp.	0.64	4.26×10^0	1.31×10^{-2}	0.53	4.40×10^{-3}	4.81×10^{-1}	b
"	<i>Sandoricum</i> sp. (1)	—	—	—	0.42	5.40×10^{-1}	—	b
<i>Moraceae</i>	<i>Artocarpus</i> sp.	0.31	2.01×10^0	4.65×10^{-2}	0.26	4.04×10^{-2}	2.35×10^{-1}	c
"	<i>Ficus</i> sp. (1)	0.61	1.02×10^1	—	0.55	2.40×10^1	—	a
"	" (2)	0.51	2.31×10^0	4.38×10^{-2}	0.37	9.85×10^0	2.04×10^{-2}	a
<i>Myristicaceae</i> (1)		0.56	2.21×10^0	5.85×10^{-2}	0.50	3.74×10^{-1}	1.53×10^{-1}	c
<i>Myrtaceae</i>	<i>Eugenia</i> sp.	0.77	2.28×10^1	1.02×10^{-2}	0.78	3.46×10^{-1}	5.39×10^{-2}	c
<i>Podocarpaceae</i>	<i>Podocarpus</i> sp. (1)	0.52	2.90×10^0	—	0.54	5.19×10^0	—	—
<i>Sapindaceae</i>	<i>Pometia</i> sp. (1)	0.64	2.52×10^1	2.89×10^{-3}	0.63	3.57×10^{-2}	2.56×10^{-1}	b
<i>Sapotaceae</i>	<i>Palaquium</i> sp. (1)	0.56	3.80×10^1	—	0.51	2.00×10^1	—	c
"	" (2)	0.64	8.84×10^0	8.04×10^{-3}	0.60	3.67×10^{-2}	3.37×10^{-1}	c
<i>Simarubaceae</i>	<i>Ailanthus</i> sp. (1)	—	—	—	0.43	1.70×10^1	—	a
"	" (2)	0.50	2.73×10^1	7.79×10^{-3}	0.42	9.06×10^0	1.16×10^{-2}	a
<i>Sonneratiaceae</i>	<i>Duabanga</i> sp. (1)	0.42	—	—	0.44	3.70×10^1	—	a
"	" (2)	0.45	1.67×10^2	—	0.46	1.90×10^1	—	a
"	" (3)	0.48	1.35×10^2	—	0.44	4.70×10^1	—	a
<i>Sterculiaceae</i>	<i>Heritiera</i> sp. (1)	—	5.80×10^1	—	0.57	6.30×10^1	—	a
"	" (2)	0.62	7.40×10^1	3.71×10^{-3}	0.56	6.18×10^1	5.00×10^{-3}	a
"	<i>Sterculia</i> sp. (1)	—	—	—	0.33	3.00×10^1	—	a
"	" (2)	—	—	—	0.36	4.50×10^1	—	a

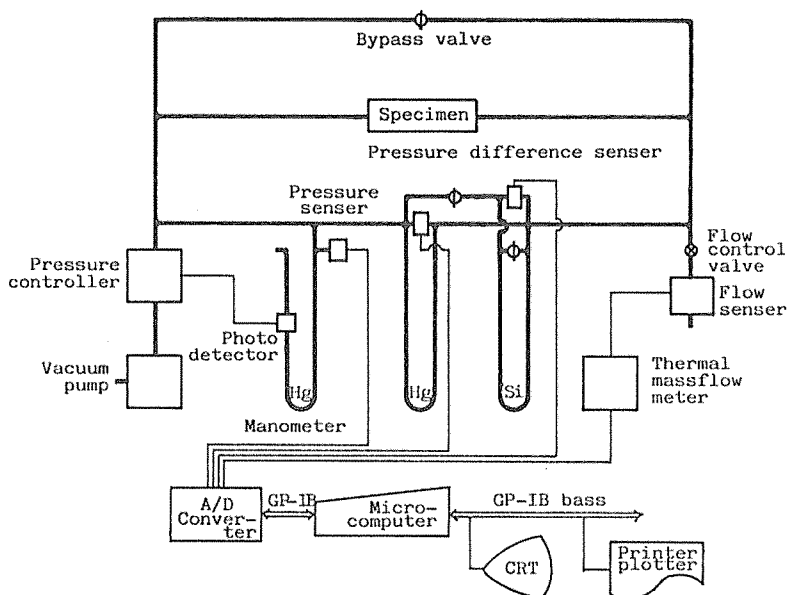


Fig. 1. Schema of measuring apparatus for gas-permeability of wood.

数として求めた。定常状態の判定は圧力状態と流量が5分間一定であることを条件とした。計算の際には空気の粘性率として 1.81×10^{-4} ポイズ (20℃)⁷⁾ を用いた。

2・2・3 測定結果と考察

みかけの通気係数 K_g は Darcy 則によって求められるが、この値は試験片中の平均圧力 \bar{p} によって変化し、一般に、図2に数樹種の例を示すように、みかけの通気係数 K_g は平均圧力の逆数 $1/\bar{p}$ の変化に伴って直線的に変化する。Klinkenberg 式

$$K_g = K_0 (1 + b \cdot 1/\bar{p})$$

はこれらの関係を表わすもので、式中 K_0 は粘性流のみによる真の値、 b は分子流の寄与を表わす係数である。以下に広葉樹を中心に樹種による差、樹幹内の通気係数分布、道管の内容物の影響等について、 K_0 および b を用いて検討する。

(1) 樹種による差異

木材の通気性は、針葉樹においては仮道管相互を連ぐ有縁壁孔の大きさおよび壁孔閉鎖の程度に、また、広葉樹においては道管の大きさおよびチロース等の有無に依存する。表1に各樹種の辺材および心材における K_0 値、 b 値を示した。ただし、心材の値は心材部分の平均値として表わしたが、この平均値は各部位の通気係数の対数値の平均を求めて示している。これは心材部分で通気係数に大きな差のある場合は、そのまま平均値を求めるとオーダーは最も通気係数の高いものに支配されるためである。また、図3にこれまで測定した本邦産材、北米産材および南洋材の結果と共に、スラウェシー産材の真の通気係数 K_0 を気乾比重との関係で値のバラツキを考慮しながら模式的に示

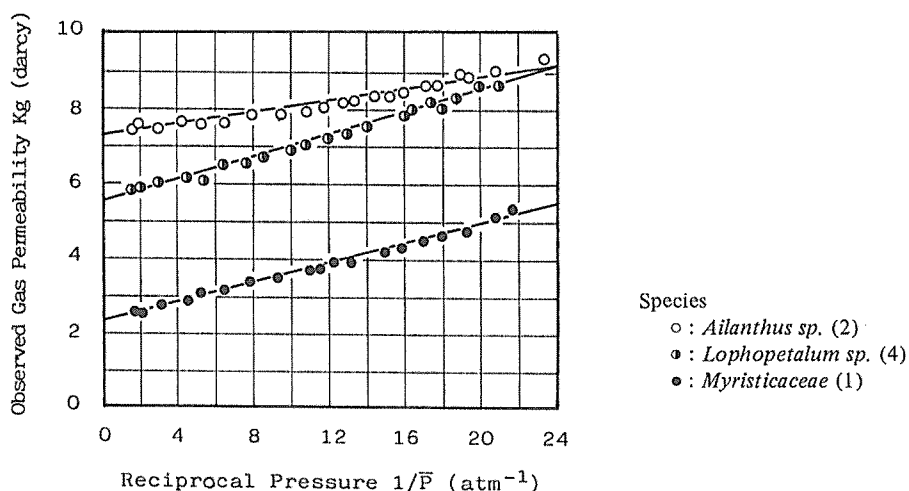


Fig. 2. Relationship between reciprocal pressure and observed gas permeability.

している。図から明らかなように、通気係数は比重と何ら相関関係は認められず、また、辺材の値は $10^0 \sim 10^2$ darcy の範囲であるのに対し、心材では $10^{-3} \sim 10^2$ darcy とその変化の範囲は非常に大きい。

道管内の内容物がほとんど認められない辺材部について、通気係数と道管率、道管径との関係を調べた。道管率の近い3組の比較を表2に示す。全体としては道管率の高い樹種は高い通気係数を示す傾向が認められるが、道管率が同じであれば、通気係数は道管径によって決まる。広葉樹の通気経路である道管を円筒と仮定すれば、ポイズル則によって通気係数はその半径の2乗に、また道管率に相当する道管数と道管断面積の積の1乗に比例することになり、通気係数は道管率以上に道管径に依存することが解る。

Table 2. Permeability change with vessel diameter

Species	Vessel ratio (%)	Vessel diameter (%)	Permeability (darcy)
<i>Ailanthus</i>	7.6	200 – 300	2.73×10
<i>Ficus</i>	7.0	170 – 280	2.31×10
<i>Calophyllum</i>	14.9	120 – 300	1.12×10
<i>Dysoxylum</i>	15.5	100 – 200	4.26×10
<i>Gonystylus</i>	11.0	160 – 200	1.62×10
<i>Litsea</i>	11.1	70 – 150	3.79×10

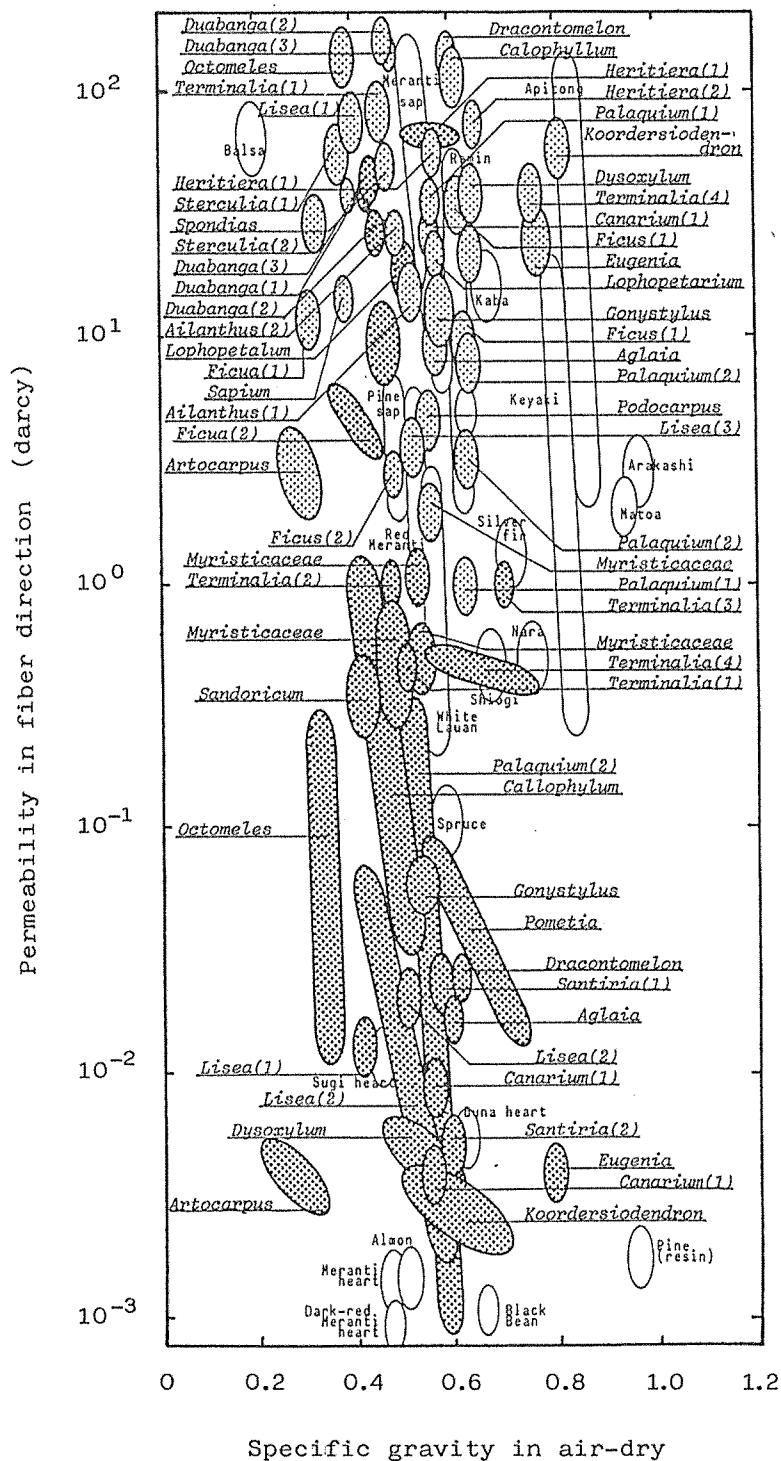


Fig. 3. Permeability vs. specific gravity in air-dry.

(2) 樹幹内における通気係数の分布

図4に数樹種を例に樹幹内各部位での真の通気係数 K_o の変化を示す。図中各曲線の左端から1～2の測定値は辺材部分の結果である。図から明らかなように、樹幹内分布は樹種によって著しく異なる。辺材から心材に移行するに伴ない通気性が急激な低下する樹種は、その道管内にチロースその他の内容物が存在すると考えて良い。そこで、写真1～4に種々の内容物の存在形態を示す。心材部分の道管内に顕著なチロースの存在を示す *Dracontomelon* sp. にあっても、その辺材部にはチロースは認められない。写真1～4と図3とを対比して調べると、内容物の存在と通気係数の大巾な低下とがよく合致しているのが解る。そこで、内容物の存否を次の3つのタイプに分類し、供試樹種心材部分の観察結果を表1に示す。

タイプa：各辺材及び *Duabanga* sp. (3) のように道管内に内容物が認められないか、あるいは、何らかの沈着物が道管壁に認められる(写真1)。

タイプb：*Aglaia* sp. のように、チロースは認められないが、道管せん孔部にふたをするように樹脂様の内容物が存在する(写真2)。

タイプc：*Dracontomelon* sp, *Lisea* sp. (1) のように道管内にチロースが認められるもの(写真3, 4)。

b値は分子流の寄与を表わす係数であり、分子流は分子の平均自由行程に比べ通気経路が狭小である場合に顕著な影響を示す。図5に示すように K_o 値とb値の樹幹内分布は全く逆の傾向を示し、この両者の相関を調べると図6に示すように両対数軸上で良い直線関係を示す。また、図中に示すように、 K_o 値の低下およびb値の上昇の主要原因は道管内のチロースの存在(タイプc) および樹脂様物質等による道管せん孔の閉鎖(タイプb)であることが解る。定常状態の繊維方向通気性は繊維方向に平行に配列する各種の通気経路における通気性の和と考えられ、その値は内容物を含まない道管のような通気性の高いものに支配される。したがって、図6中のチロースその他の内容物が認められるが、高い通気性を示す *Canarium* sp. (2), *Gonystylus* sp, *Artocarpus* sp. および *Eugenia* sp. では心材化に伴う道管内の内容物の沈着が不均一で、内容物が充満していない道管が相当数残っている可能性がある。

(3) 通導経路の観察

前報⁸⁾で示した通水経路の観察と同様に、蛍光色素ローダミンB希薄水溶液を繊維方向約3cmの長さの試験片の繊維方向に透過させた後、試験片の流出端附近から木口面のミクロトーム切片を作製し、落射型蛍光顕微鏡で観察した。グリーン励起により蛍光色素の透過細胞の内壁が暗視野内に赤い発光部として観察され、透過に関与した細胞を明確に認識することができる。

写真5に *Eugenia* sp. の辺材、辺材に近い心材、樹心に近い心材の各部位での透過細胞を示す。辺材部分は道管だけでなく木繊維も透過に関与し(写真5-(a))、辺材に近い心材部分では全ての道管がチロースによって閉鎖されるのではなく、約2割程度の道管は透過に関与していることが認められる(写真5-(b))。図4, 5に示すように、*Dracontomelon* sp. *Lisea* sp. (3) および *Aglaia* sp. の樹幹内分布のように、全ての心材で通気性は非常に低いのが一般的であるが、*Eugenia* sp. は樹心から約75%の心材部でも、辺材と同様に高い通気性を示している。この原因として、写真6に示す

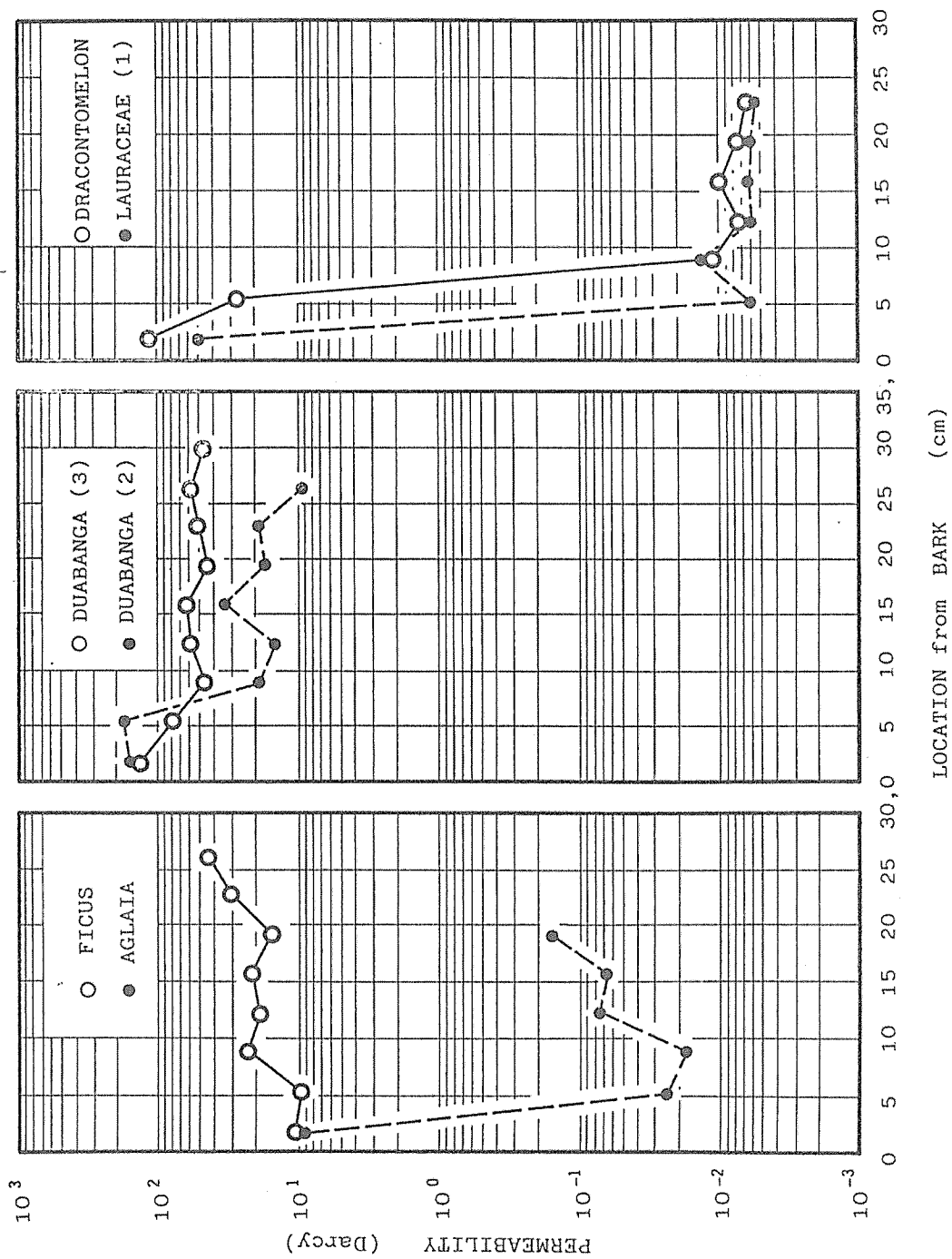


Fig. 4. Permeability distribution in radial direction.

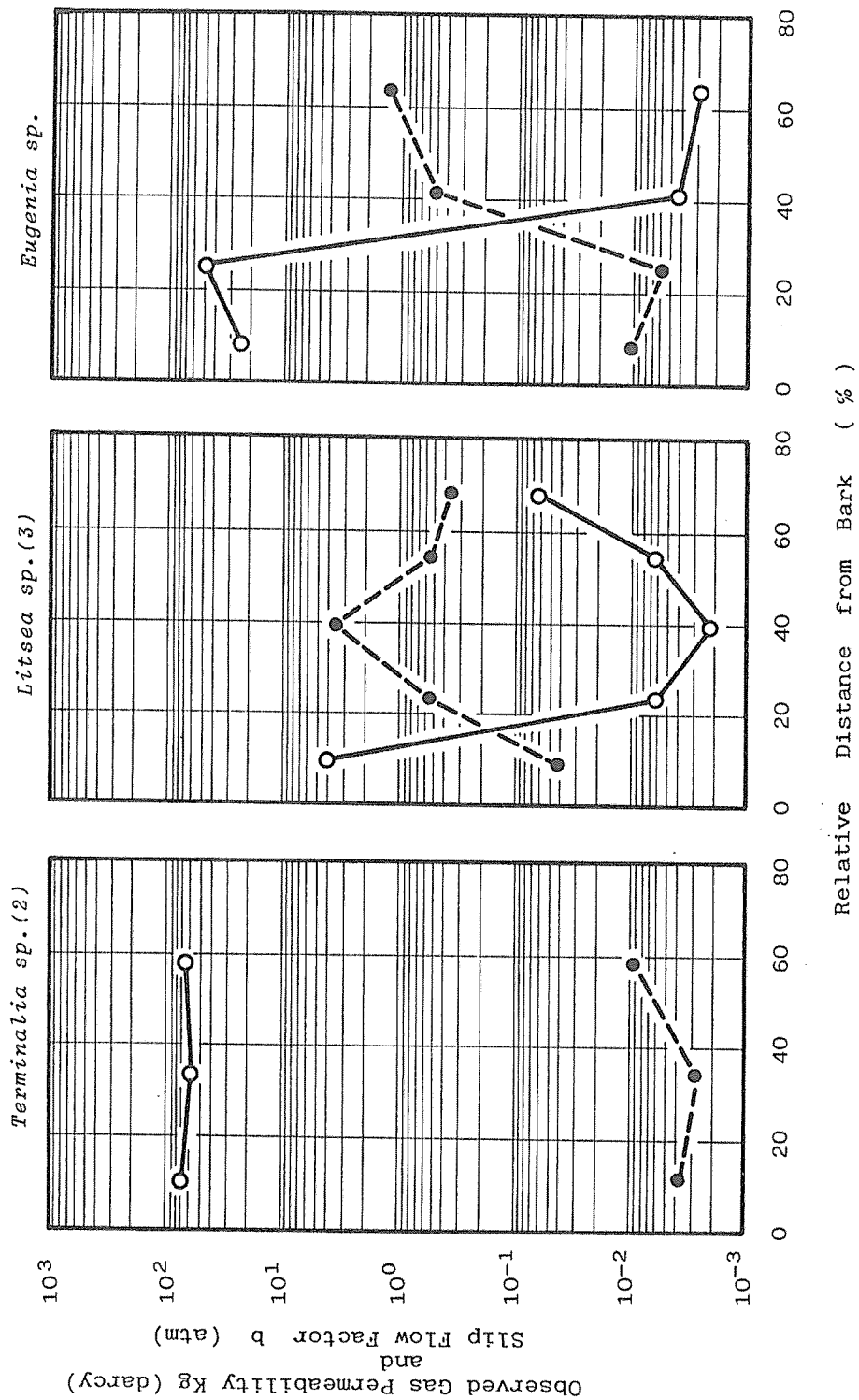
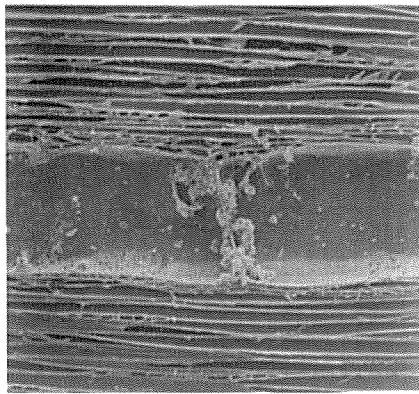
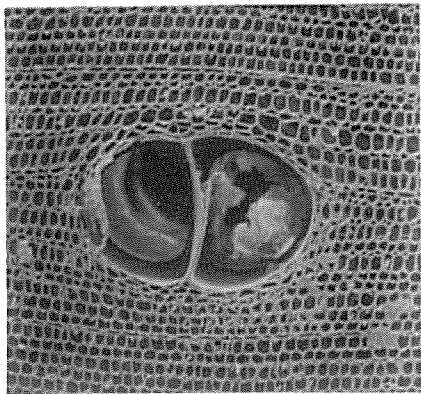
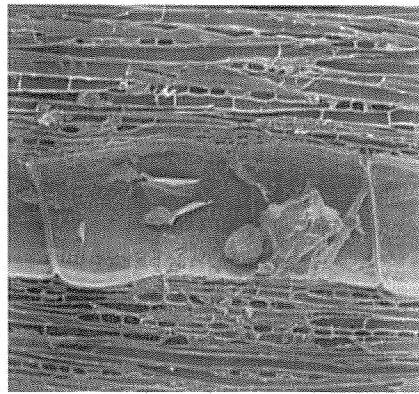
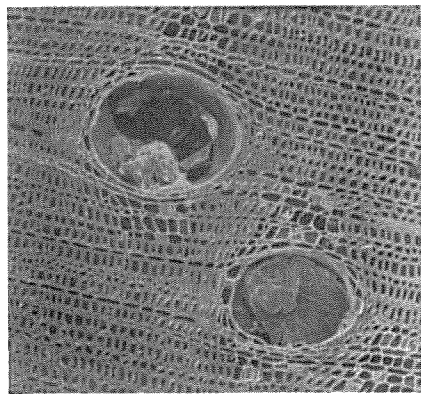


Fig. 5. Influence of position in radial direction on gas permeability Kg and slip flow factor b.

Symbol ○ : observed gas permeability, ● : slip flow factor

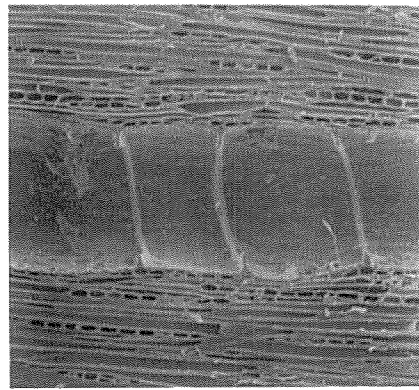
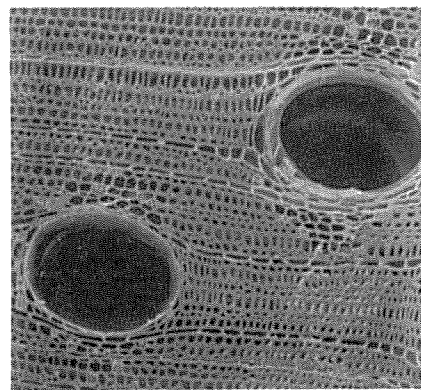


19 cm



14 cm

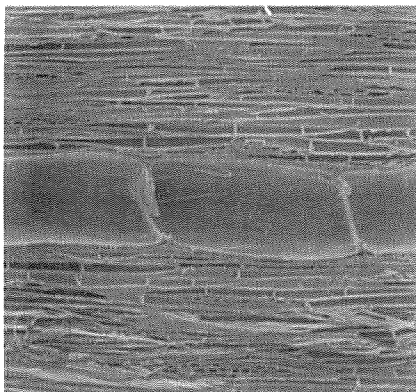
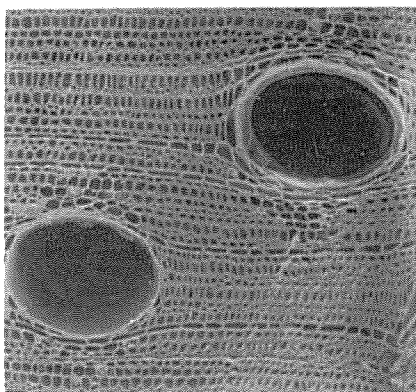
LOCATION from BARK



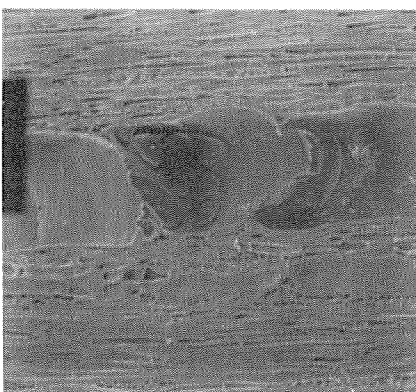
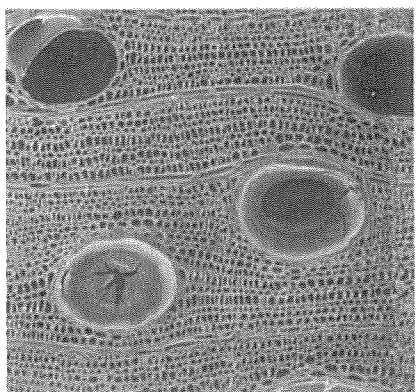
100 μ m

2 cm

Photo 1. Contents in vessel of Duabanga sp (3).



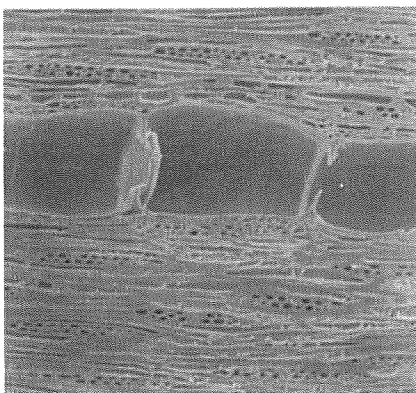
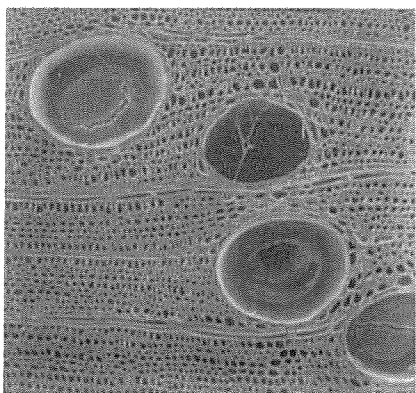
18 cm



6 cm

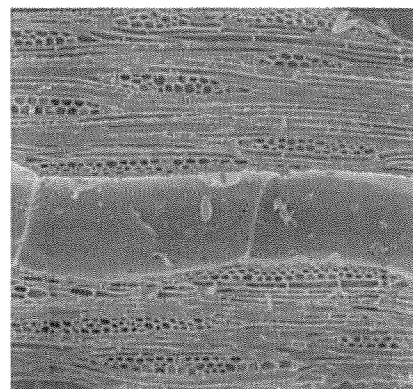
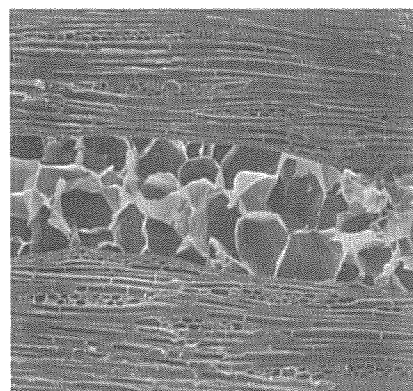
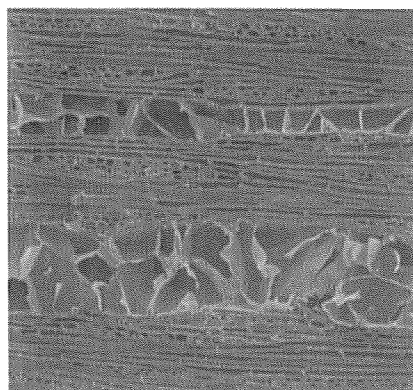
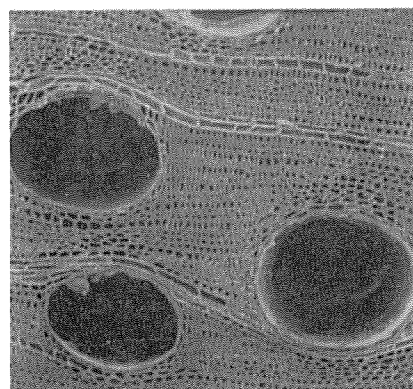
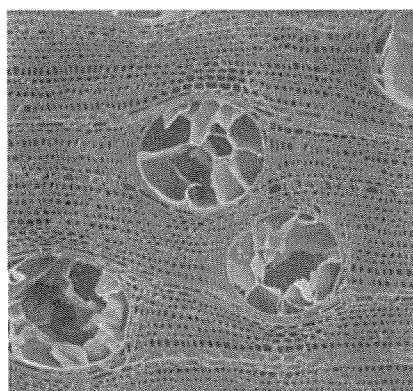
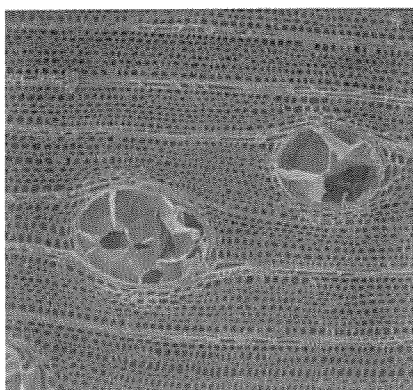
LOCATION FROM BARK

Photo 2. Contents in vessel of *Aglaia* sp.



100 μ m

2 cm



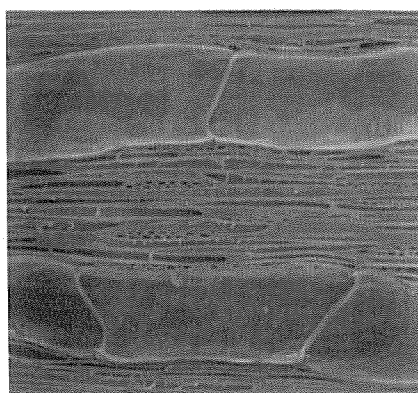
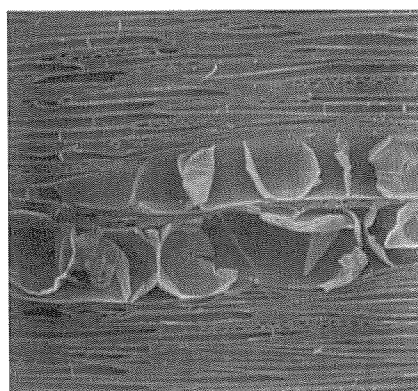
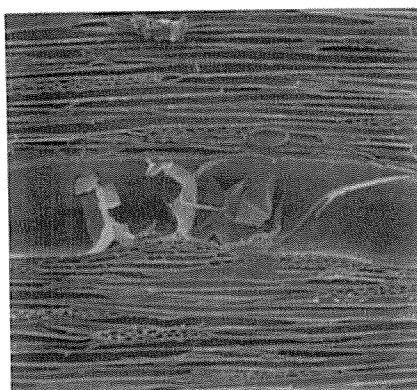
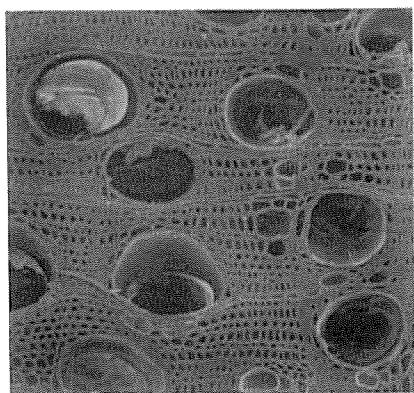
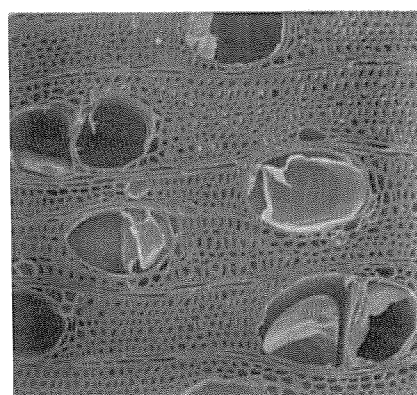
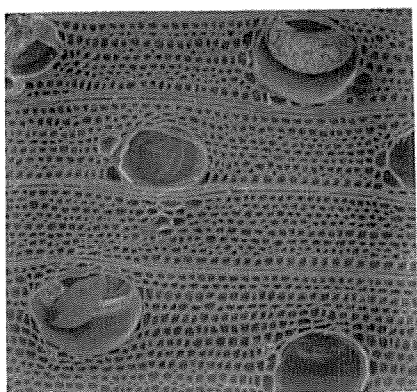
25 cm

14 cm

2 cm
100 μ m

LOCATION from BARK

Photo 3. Contents in vessel of *Dracontomelon* sp.



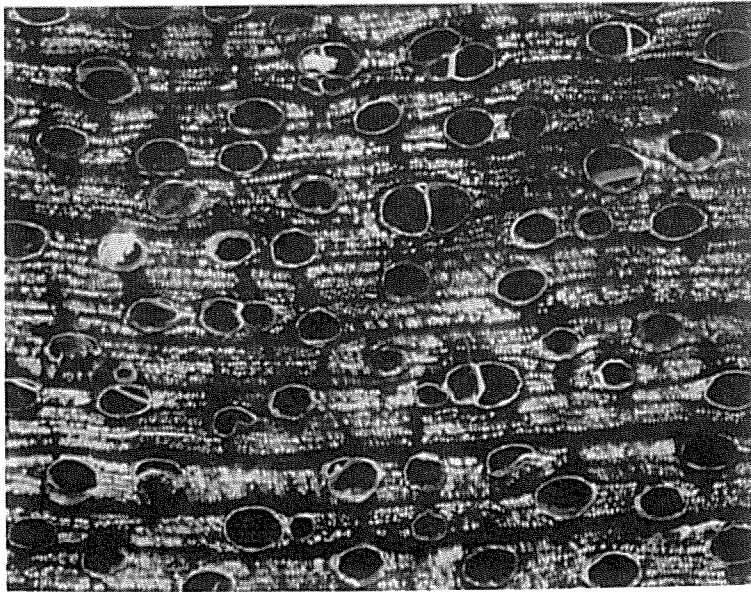
2 cm
100 μ m

6 cm

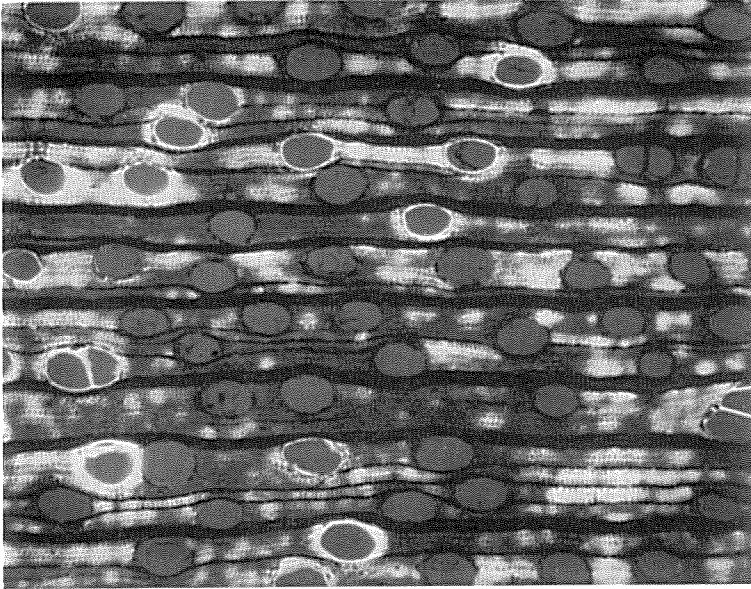
22 cm

LOCATION from BARK

Photo 4. Contents in vessel of *Litsea* sp (1).



(a)



(b)

Photo 5. Permeable parts in cross section of *Eugenia* sp.
 White parts are permeable.
 Relative position from bark
 (a) : 10%
 (b) : 50%

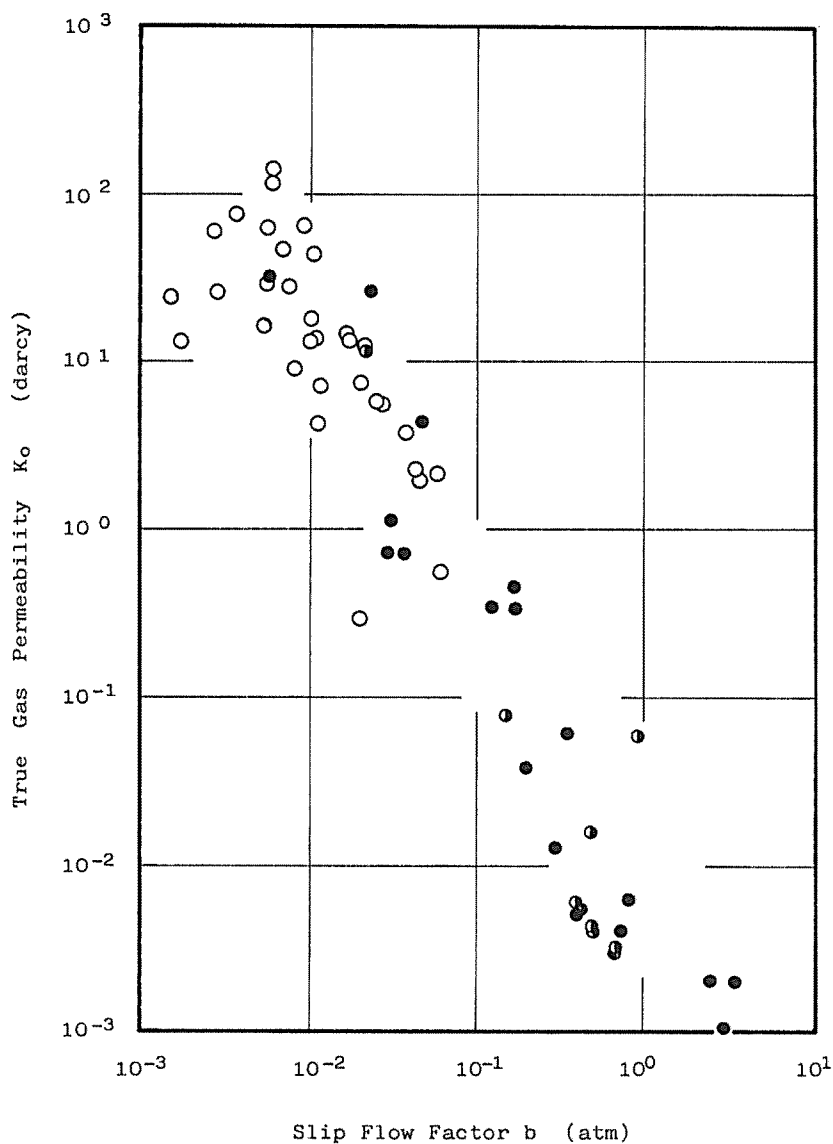


Fig. 6. Relationship between true permeability K_o and slip flow factor b .
Type of contents in vessel

- : type a
- ◐ : type b
- : type c

ように、一部の道管が通気に関与しているためと思われる。樹心から 60 % 以下の相対位置では通気係数は約 5×10^{-3} darcy に急激に低下する。この部位では、道管は透過には全く関与せず、木繊維の一部が透過に関与するのみであり、低い通気性の結果と一致する。また、写真 5-(b) に示されるように、チロースによって閉鎖された道管の周囲の木繊維も透過に関与していないのが認められ、チロースがこれらの細胞にも何らかの影響を与えているものと判断される。

2・2・4 結 論

スラウェシー産材の定常状態の通気性を検討した結果、次の結論を得た。

- 1) 通気係数と比重とは全く相関関係が認められず、本邦産材、北米産材あるいは他の南洋材に比べ産地の特徴は認められない。
- 2) 通気係数は、辺材で $10^0 \sim 10^2$ darcy の範囲であるのに対し、心材では $10^{-3} \sim 10^2$ darcy とその変化幅は非常に大きい。これは道管中のチロースその他の内容物の有無に依るためである。
- 3) 心材部の通気係数の変化と道管内容物の有無とは非常に良く合致する。広葉樹においては、チロースおよび道管のせん孔をふさぐような樹脂様内容物の存在によって通気係数は 10^{-2} darcy 以下に低下する。
- 4) 道管がチロース等で閉鎖されると、道管の周囲の柔細胞あるいは木繊維にもその影響がおよび通導に関与しなくなる。

引 用 文 献

- (1) 金川 靖・寺沢 真・伊藤基信；木材工業，33，241（1978）
- (2) 奥山 剛；名古屋大学農学部演習林報告，8号，94（1984）
- (3) 金川 靖；名古屋大学農学部演習林報告，8号，54（1984）
- (4) Bramhall, B.；Wood Sei. Technol., 5, 121（197）
- (5) 河辺純一・森 稔；材料，30-334，22（1981）
- (6) Perng, W. R.；木材誌，26，219（1980）
- (7) 玉虫文一他編；「理化学辞典」，1008頁，岩波書店，1971
- (8) 近藤久晴・金川 靖；材料，32-359，875（1983）

2.2.5 Summary

Permeability Properties

The permeability of wood was an indicator for wood preservation, chemical modification, wood drying and others. The permeability depended on the flow direction and the situation of path way. Specially, in longitudinal direction of hard woods, the permeability depended on contents like as tylose in vessels.

In this paper, the permeability in longitudinal direction was measured under various conditions with a evacuation method (see Fig. 1). Dimension of cylindrical specimen used was 3 cm in diameter and 10 cm in length. Almost of species was measured permeabilities at several positions in radial. When there were contents in vessel, path ways were died with a fluorochrome (Rhodamine B) water solution and observed.

Results obtained were as follows;

- (1) Permeabilities in sap woods were $10^0 - 10^2$ darcy. On other hand, permeabilities in heart wood were distributed in very wide range of $10^{-3} - 10^2$ darcy. These results depended on existence of contents like as tylose in vessel (see Fig. 4 and Photo 1 - 4).
- (2) Permeability and slip flow factor had a opposite relationship (see Fig. 5, 6).
- (3) In case of filling in vessel with tylose or closing perforation plate with some contents, fibers and parenchyma cells gathered to vessel did not performed to flow and its permeability decreased steeply to 10^{-2} darcy.