

広葉樹気乾材への液体浸透

矢田 茂樹・椋代 純輔・梶田 熙

SHIGEKI YATA, JUNSUKE MUKUDAI and HIROMU KAJITA

Penetration of liquid into the air-dried hardwoods

要旨 広葉樹の気乾材50種への水および0.5% Direct Sky Blue 6B水溶液の浸透実験(大気圧下の毛管上昇と減圧注入)を行い浸透量の測定と着色部の顕微鏡観察をした。その結果、毛管上昇法によるL方向の移動の場合、ビワ、トチノキは易浸透で、キリ、キハダ、タブ、クスノキは著しく難浸透であった。辺材は心材よりも易浸透の樹種が多いが、エンジュ、ポプラ、シオジ、ヤチダモでは有意差がなかった。木材組織内への流動は著しく不均一に進行したが、一年輪内での流動状態には樹種により一定の傾向が認められた。比重・年輪幅の影響は認められない。R・T方向はL方向よりも難浸透で、放射組織は浸透にあまり寄与しない。減圧注入した時、辺材の注入量は比重依存性を示したが、心材では無相関であった。木材組織内への流動は一部完全浸透の樹種を除き多くの樹種で不均一に流動しており、木繊維・多列放射組織を中心に著しく多数の細胞が未流動のまま残り残された。

緒言

これまでの一連の研究から^{1)~3)}、吸湿・膨潤した木材中へ無機電解質水溶液が浸透したとき溶質であるAg, Cu, Zn, Cr (VI)などのイオンは内こう壁面から細胞壁内に容易に拡散移動しうること、さらに隣接する細胞内こうが未流動であった場合にはその細胞壁へも壁を貫通して拡散移動していく様子が具体的に明らかにされた。そして比較的狭い範囲であれば壁を伝う溶質拡散によって薬剤分布の均一化がはかれることが示唆された。一般に広葉樹材への液体浸透は不均一に進行するとされている^{4)~7)}。貴島・林⁴⁾はブナ、シオジ、レッドラワン辺材について「液体はまず道管に率先浸透する。道管から周囲細胞への浸透は著しくない。それでも仮道管、木柔細胞、放射柔細胞へは比較的容易に浸透するが木繊維への浸透はむしろまれである」としている。一方Stoneら⁵⁾はaspenについてパルプ化剤はまず道管に流動し周囲細胞へは拡散により移動すると述べている。またWardropら⁶⁾はEucalyptus regnans 辺材では、まず道管に入りそこから隣接

する木繊維、軸方向および放射柔細胞に壁孔を通して流動し、さらに放射柔細胞から隣接木繊維中に流動すると述べている。以上のように木材組織中への液体流動範囲についての見解は必ずしも一致していないが、これは注入方法の差異あるいは樹種による組織構造の差異によるものかも知れない。

広葉樹の場合、樹種により組織構造、比重などに著しい差異がある。そこで本研究では多数の広葉樹気乾材について、大気圧下での毛管上昇過程における吸水量の測定と流動経路の顕微鏡観察を行った。また減圧注入した試片についても浸透量の測定と組織内における流動範囲の観察を行った。こうして樹種別に浸透性の大小を比較すると同時に流動過程において組織内に未浸透のまま残り残される細胞の種類と分布を明らかにした。

材料および方法

1. 供試材

本実験では散孔材29種、環孔材21種の合計50種を使用した(Table 1)。なおアラカシなどの放射孔材は散孔

京都府立大学農学部木質材料学研究室

Laboratory of Wood Based Materials, Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural University, Kyoto, Japan.

本報を「木材細胞壁内への物質移動」の第6報とする。

本報告の一部は、第31回日本木材学会大会(1981年4月東京)において発表した。

昭和56年7月3日受理

Table 1 Wood samples

Common name	Scientific name
Diffuse-porous wood	
1 ARAKASHI	<i>Quercus glauca</i> Thunb.
2 SHIRAKASHI	<i>Quercus myrsinaefolia</i> Blume
3 AKAGASHI	<i>Quercus acuta</i> Thunb.
4 BUNA	<i>Fagus crenata</i> Blume
5 MOCHINOKI	<i>Ilex integra</i> Thunb.
6 NANAMENOKI	<i>Ilex chinensis</i> Sims.
7 SOYOGO	<i>Ilex pedunculosa</i> Miq.
8 AOHADA	<i>Ilex macropoda</i> Miq.
9 YAMAZAKURA	<i>Prunus jamasakura</i> Sieb.
10 UWAMIZUZAKURA	<i>Prunus grayana</i> Maxim.
11 BIWA	<i>Eriobotrya japonica</i> Lindl.
12 FUU	<i>Liquidambar formosana</i> Hance
13 ISUNOKI	<i>Distylium racemosum</i> Sieb. et Zucc.
14 HANNOKI	<i>Alnus japonica</i> Steud.
15 MAKANBA	<i>Betula maximowiczii</i> Regel
16 POPLAR	<i>Populus nigra</i> L. var. <i>italica</i> Koehne
17 TABUNOKI	<i>Machilus thunbergii</i> Sieb. et Zucc.
18 KUSUNOKI	<i>Cinnamomum camphora</i> Sieb.
19 KAKI	<i>Diospyros kaki</i> Thunb.
20 NEJIKI	<i>Lyonia elliptica</i> Okuyama
21 YABUTSUBAKI	<i>Camellia japonica</i> Linn.
22 YAMAURUSHI	<i>Rhus trichocarpa</i> Miq.
23 HÖNOKI	<i>Magnolia obovata</i> Thunb.
24 RYÖBU	<i>Clethra barbinervis</i> Sieb. et Zucc.
25 KATSURA	<i>Cercidiphyllum japonicum</i> Sieb. et Zucc.
26 MUKUNOKI	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
27 TOCHINOKI	<i>Aesculus turbinata</i> Blume
28 KUMANOMIIZUKI	<i>Cornus macrophylla</i> Wall.
29 ONIGURUMI	<i>Juglans mandschurica</i> subsp. <i>sieboldiana</i> (Maxim.) Kitam.
Ring-porous wood	
1 AKINIRE	<i>Ulmus parvifolia</i> Jacq.
2 KEYAKI	<i>Zelkova serrata</i> Makino
3 ENOKI	<i>Celtis sinensis</i> Pers. var. <i>japonica</i> Nakai
4 ENJYU	<i>Sophora japonica</i> Linn.
5 NISEAKASHIYA	<i>Robinia pseudo-acacia</i> L.
6 NEMUNOKI	<i>Albizia julibrissin</i> Durazz.
7 KONARA	<i>Quercus serrata</i> Thunb.
8 MIZUNARA	<i>Quercus crispula</i> Blume
9 KUNUGI	<i>Quercus acutissima</i> Carr.
10 KURI	<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc.
11 TAKANOTSUME	<i>Evodiopanax innovans</i> Nakai
12 SEN	<i>Kalopanax septemlobus</i> Koidz.
13 YACHIDAMO	<i>Fraxinus mandshurica</i> Rupr. var. <i>japonica</i> Maxim.
14 SHIJI	<i>Fraxinus spaethiana</i> Lingelsh
15 NURUDE	<i>Rhus chinensis</i> Mill.
16 YAMAGUWA	<i>Morus bombycis</i> Koidz.
17 AKAMEGASHIWA	<i>Mallotus japonicus</i> Muell. Arg.
18 NIWAURUSHI	<i>Ailanthus altissima</i> Swingle
19 KIHADA	<i>Phellodendron amurense</i> Rupr.
20 KIRI	<i>Paulownia tomentosa</i> Steud.
21 KENPONASHI	<i>Hovenia dulcis</i> Thunb.

材に含めた。試験片寸法は $5(L) \times 2(R) \times 2(T)$ cm を基準としたが辺材幅の狭い材は半径方向（以下R方向）の寸法を2 cm 以下に、またポプラのように年輪幅が著しく広い材では2.5 cm にした。試験片は実験室内に放置し気乾状態まで乾燥した (MC: 10~13%)。丸太横断面上の採材部位は樹皮側から内部に向けて No. 1, No. 2 ……と順次番号を付して採材した。材色で心・辺材を区分できる材はそれぞれについて採材し、材色で区分できない材については No. 1 を最外部材 (Outermost sample), No. 2 以降を内部材 (Inner sample) とした。同一樹種で複数の個体を供試した場合には樹種名のあとに A, B ……をつけた。

2. 供試液体

蒸留水および0.5% Direct Sky Blue 6B 水溶液を使用した。この染料は堀池ら⁸⁾により木材への易浸透性染料として報告されているが、予備実験の結果でも木材への浸透過程において溶媒と完全に分離することがなく、かつ分子量が大きいため湿潤細胞壁内へほとんど拡散移動しないことが判った。したがって、この染料は木材中への水の流動経過観察用に適していると判断した。

3. 実験方法

本実験では大気圧下の毛管上昇法および減圧注入法を用いた (Fig. 1)。まず毛管上昇法では、水をはった

デシケーター内に直径12 cm の結晶皿を置きその中に60 ml の蒸留水を入れた。なお皿の底には12メッシュの網を敷いた。そして側面をエポキシ樹脂でシールし下面をナイフで平滑に面出しした試片を図のようにセットした。浸透方向は繊維方向（以下L方向）、接線方向（以下T方向）およびR方向であった。その後、経時的に試片を取り出し側面の付着水をろ紙でぬぐい去ってから秤量した。なお1回の取り出し秤量時間は約30秒であった。同一条件の試片数は5個とし、それとは別に試片上面からの吸湿量を差引くために吸湿量測定用試験片を結晶皿の横に置いた。最終的な吸水時間は4~9時間であった。最後の秤量時には試片下面の付着水をぬぐい去った時の重量も測定しその差を全測定値から差引いた。こうして単位面積あたりの吸水量を経時的に求めた。この場合途中で取り出さず連続して吸水させた場合と上記のように時々取り出して秤量した場合とは各種の条件が異なるかも知れないが、ブナ材を用いた予備実験の結果によると最終的な吸水量に有意差が認められなかった。

吸水実験を終えた試片は再び気乾状態まで乾燥し、今度は染料水溶液を所定時間浸透させた。取り出した試片はその下面をロータリーポンプで減圧脱液し、そのあと105°Cの乾燥器内で乾燥した。そしてFig. 1に示したようにL方向試片の場合下面から約2.3 mm 間隔で順次鋸断し、エポキシ樹脂で包埋したのち薄片化して、着色部の顕微鏡観察を行った。R・T方向については試片中央部を観察した。また道管の面積占有率および道管内のチロースの有無も調べた。

一方、減圧注入法の場合には、試片を相互に接触しないようにしてビーカー内に置き染料水溶液を入れたのち、30°Cで24時間、23~24 mmHgで吸引脱気し、そのあと大気圧下で20時間放置して溶液を吸収させた。その後周囲の付着水をぬぐい去ってから秤量し注入量 (g/cm^3) を求めた。そして乾燥後、試片中央部を鋸断して着色部の顕微鏡観察をした。

結果と考察

1. 毛管上昇法における吸水量と時間の関係

Fig. 2 に吸水量と時間の関係の一例を示す。両者の関係は放物線状を呈するが、横軸に時間の平方根をとると両者は直線関係となり、その実験式は $y = a + b\sqrt{x}$ で表される。すでに吸水量と時間の平方根との間には初期段階において正比例関係が成立することが知られているが^{9)~11)}、本実験の結果も二、三の例外を除いて相関係数は0.9以上を示した。実験式の切片 a はいずれの樹種でも微小であった。一方勾配 b は吸水性の大

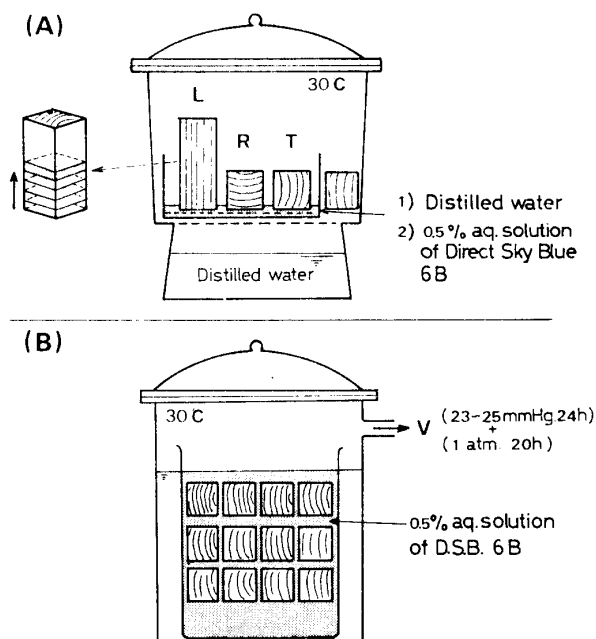


Fig. 1. Methods of liquid penetration into wood. (A) Penetration by capillary pressure. (B) Impregnation under the vacuum evacuation and subsequent atmospheric pressure.

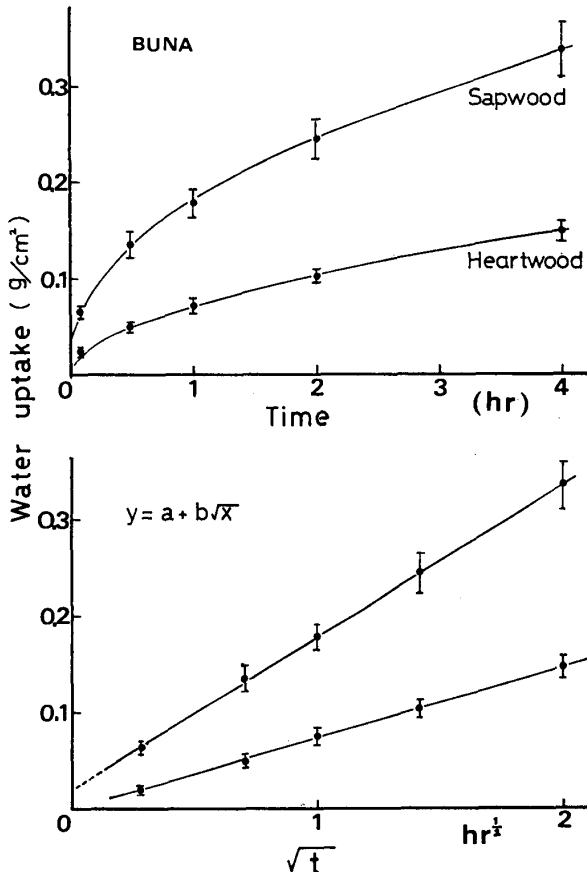


Fig. 2. Relationship between water uptake by capillary pressure and penetration time. The vertical lines through the data points show the standard deviation.

小を示す指標として使用できるものと考えられる。そこで各樹種について勾配 b およびその95%信頼区間をTable 2~4に示した。まずL方向の吸水については樹種間にかかなりの差があり、ビワ、トチノキなどの易浸透材とキリ、タブノキなどの難浸透材との間には20倍程度の差異が認められた。環孔材と散孔材の差については、環孔材は散孔材よりも概して浸透速度が大きいとする報告もあるが¹²⁾、本実験に使用した樹種ではそのような傾向は認められなかった。心材と辺材の差については、従来の通説どおり辺材の方が良好な樹種が多く、特にホオノキ、オニグルミ、トチノキなどで著しい差が認められた。しかし、エンジュ、ポプラ、シオジ、ヤチダモでは有意差はなかった。年輪幅・気乾比重の影響は認められなかった。

R・T方向の吸水性については(Table 3~4)、L方向よりも明らかに浸透不良であり、その比(b 値のT/L)は1/30(ビワ)~1/3(ヤマグワ)まで広範囲にわたっている。RとT方向の間にはあまり差はない。

2. 減圧注入法による注入量

減圧注入法による注入量と材の気乾比重の関係を

Fig. 3に示した。辺材の注入量はキリを除いて明らかに比重に反比例しており、本実験のような注入条件では、注入量は材の空隙量に依存することがわかる。しかし、心材ではポプラのような易浸透材からクスノキ、タブノキのような難浸透材まで大きく変動しており、比重依存性は認められない。葉石・中野¹³⁾はJIS Z 2104に基く吸水実験から、24時間後の吸水量と比重との間に辺材では負の相関が認められるが心材では無相関であったとしている。また林・西本¹²⁾は16種の広葉樹について浸透速度と比重の関係は明瞭でないとしている。本研究でも大気圧下の9時間にわたる毛管上昇の場合には比重依存性は認められていない。結局、毛管圧にもとづく初期の流動過程ではその速度は単なる空隙量には依存しないが、最終的な吸収量あるいは強制的な注入処理をした場合の注入量には空隙依存性が現われてくるものと考えられる。

3. 毛管上昇過程における水溶液の流動範囲

心材は浸透不良のため外表面に近い部分しか着色しなかったので省略し、ここでは辺材について観察を行った。L方向への染料水溶液の毛管上昇は非常に不均一に進行している。しかし、一年輪内での流動状態には樹種により一定の特徴が認められた。Photo. 1はリョウブで、道管に優先的に流動し、一年輪内では晩材部道管に優先的に流動している。なお樹皮に近い最外部1~2年輪の道管は早・晩とも著しく浸透良好で、この傾向は他のほとんどの樹種においても認められた。Photo. 2は、リョウブとは逆に早材部に良好に流動するヤブツバキの例である。この傾向を示す樹種は他に

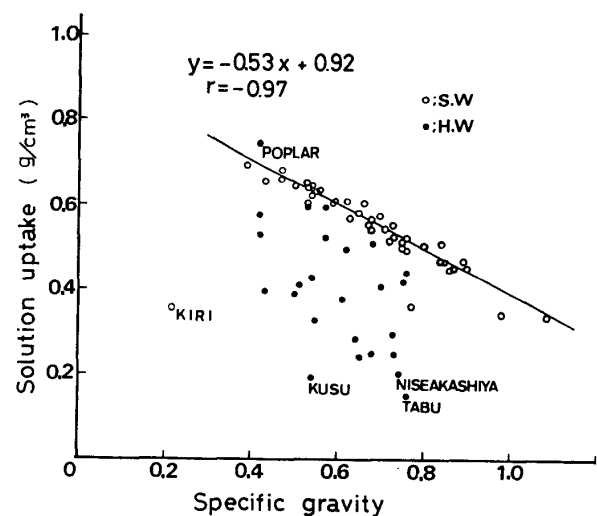


Fig. 3. Amount of 0.5% aqueous solution of Direct Sky Blue 6B impregnated into wood under the vacuum evacuation and atmospheric pressure vs. specific gravity of wood. S.W; sapwood, H.W; heartwood.

Table 2 Slope of the regression line drawn between the water uptake of wood and the square root of time. Penetration to longitudinal direction by capillary rise method.

Diffuse-porous wood	Sapwood				Heartwood			
	No.	<i>W</i>	<i>r_a</i>	<i>b</i>	No.	<i>W</i>	<i>r_a</i>	<i>b</i>
TOCHINOKI	1	1.3	0.55	0.667±0.491	2	1.3	0.56	0.144±0.028
HŌNOKI	A-1	3.8	0.47	0.381±0.039	A-3	1.6	0.48	0.057±0.012
	A-2	3.2	0.46	0.254±0.028	B-1	3.4	0.50	0.046±0.004
MAKANBA	A-1	0.5	0.68	0.282±0.038	A-2	1.6	0.79	0.131±0.027
	B-1	0.5	0.65	0.214±0.021	B-2	0.8	0.78	0.044±0.006
NEJIKI	1	0.6	0.78	0.255±0.043				
YABUTSUBAKI	A-1	1.5	0.87	0.212±0.046				
	B-1	1.3	0.82	0.267±0.038				
POPLAR	1	10.0	0.46	0.212±0.057	3	18.0	0.42	0.159±0.026
	2	13.0	0.43	0.181±0.052	4	13.0	0.40	0.147±0.024
ONIGURUMI	1	1.3	0.40	0.187±0.020	2	1.5	0.45	0.035±0.004
					3	2.1	0.56	0.072±0.003
BUNA	1	1.0	0.55	0.159±0.012	4	1.3	0.63	0.087±0.010
	2	1.3	0.57	0.157±0.017	5	1.7	0.66	0.073±0.003
	3	0.7	0.55	0.236±0.022				
FUU	1	5.3	0.67	0.183±0.093				
YAMAZAKURA	A-1	4.2	0.74	0.138±0.017	A-2	4.5	0.71	0.098±0.006
	B-1	4.4	0.63	0.192±0.033	B-2	4.7	0.66	0.052±0.004
					B-2	3.8	0.69	0.055±0.004
UWAMIZUZAKURA	1	0.8	0.54	0.155±0.016	2	2.7	0.52	0.058±0.004
					3	2.3	0.51	0.069±0.003
NANAMENOKI	1	2.0	0.76	0.116±0.005				
KUMANOMIZUKI	1	1.1	0.69	0.105±0.035				
AOHADA	1	1.5	0.75	0.102±0.020				
YAMAURUSHI	1	2.8	0.62	0.101±0.014				
ARAKASHI	A-1	1.4	0.91	0.074±0.005				
KUSUNOKI	1	4.0	0.55	0.078±0.005	2	6.0	0.59	0.044±0.002
KATSURA					1	2.5	0.46	0.076±0.003
TABUNOKI					1	0.9	0.73	0.035±0.002
	Outermost sample (Sapwood)				Inner sample*			
BIWA	1	2.4	0.76	0.674±0.063	2	1.4	0.76	0.574±0.065
HANNOKI	1	2.3	0.55	0.322±0.037	2	1.9	0.56	0.521±0.026
ISUNOKI	1	0.9	0.90	0.295±0.034	2	0.9	0.93	0.196±0.047
RYŌBU	1	1.4	0.75	0.214±0.023	2	1.7	0.76	0.187±0.004
MUKUNOKI	1	0.9	0.67	0.173±0.045	2	0.7	0.60	0.128±0.012
MOCHINOKI	1	1.5	0.55	0.155±0.052	2	5.0	0.58	0.078±0.031
KAKI	1	2.0	0.78	0.120±0.016	2	2.1	0.79	0.112±0.019
SOYOGO	1	0.8	0.72	0.095±0.005	2	0.6	0.69	0.078±0.022
SHIRAKASHI	1	1.7	0.90	0.080±0.006	2	1.8	0.86	0.103±0.003
ARAKASHI	B-1	3.0	0.98	0.067±0.003	B-2	3.0	1.04	0.058±0.005
AKAGASHI	1	3.6	0.98	0.066±0.012	2	6.0	1.0	80.098±0.006

Table 2 Continued

Ring-porous wood	Sapwood				Heartwood			
	No.	<i>W</i>	<i>r_a</i>	<i>b</i>	No.	<i>W</i>	<i>r_a</i>	<i>b</i>
MIZUNARA	A-1	0.9	0.58	0.385±0.079	A-2	1.0	0.64	0.094±0.003
					B-1	1.2	0.59	0.177±0.024
					B-2	1.3	0.76	0.166±0.024
NEMUNOKI	1	3.7	0.65	0.239±0.015	2	2.8	0.61	0.098±0.007
ENJYU	1	6.0	0.71	0.227±0.029	2	8.0	0.69	0.192±0.012
					3	6.3	0.74	0.158±0.010
KEYAKI	1	1.1	0.60	0.174±0.038	2	2.1	0.72	0.051±0.006
SHIOJI	1	1.1	0.48	0.171±0.024	2	2.3	0.63	0.292±0.016
YACHIDAMO	1	1.0	0.47	0.142±0.012	2	1.4	0.59	0.206±0.015
					3	1.3	0.57	0.279±0.040
					4	1.3	0.60	0.183±0.019
					5	2.0	0.72	0.167±0.016
					6	2.0	0.72	0.277±0.019
KENPONASHI	1	1.9	0.65	0.131±0.021	2	2.3	0.69	0.049±0.007
NIWAURUSHI	1	9.0	0.54	0.104±0.015				
YAMAGUWA	1	7.0	0.74	0.099±0.005	2	10.0	0.73	0.058±0.005
NISEAKASHIYA	A-1	10.0	0.77	0.093±0.016	A-2	7.0	0.79	0.027±0.003
					A-3	6.0	0.73	0.035±0.003
					A-4	5.3	0.67	0.037±0.003
	B-1	13.0	0.77	0.076±0.007				
AKINIRE	1	6.3	0.72	0.092±0.004	2	2.5	0.75	0.039±0.006
KIHADA	1	2.2	0.52	0.082±0.008	2	2.1	0.53	0.061±0.003
KONARA	1	3.0	0.81	0.080±0.008	2	2.0	0.71	0.060±0.003
NURUDE	1	3.7	0.50	0.073±0.006	2	3.7	0.50	0.046±0.005
KURI					1	2.5	0.52	0.072±0.003
SEN					1	1.1	0.50	0.064±0.009
KIRI	1	5.0	0.22	0.033±0.003				
	Outermost sample (Sapwood)				Inner sample*			
ENOKI	1	4.3	0.75	0.166±0.013	2	6.0	0.71	0.141±0.009
AKAMEGASHIWA	1	2.3	0.54	0.122±0.012	2	4.0	0.52	0.116±0.011
TAKANOTSUME	1	2.4	0.54	0.115±0.019	2	1.2	0.53	0.108±0.018
KUNUGI	1	1.6	0.82	0.114±0.015	2	3.2	0.89	0.106±0.008

W: Average width of annual ring (mm).

r_a: Specific gravity in air-dry condition (MC; 10~13%).

b: Slope of regression line and its 95% confidence limit ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-\frac{1}{2}}$).
 $y = a + b\sqrt{x}$. *y*: water uptake (g/cm^2), *x*: time (h).

* Inner position on a cross section of wood which was impossible to distinguish between sapwood and heartwood by colour.

Table 3 Slope of the regression line drawn between the water uptake of wood and the square root of time. Penetration from the outside surface to the radial direction by capillary rise method.

Diffuse-porous wood		
Sapwood		
	r_a	b
TOCHINOKI	0.54	0.065±0.020
FUU	0.64	0.036±0.012
YAMAZAKURA	0.67	0.030±0.001
MUKUNOKI	0.61	0.030±0.001
HANNOKI	0.54	0.028±0.005
MOCHINOKI	0.55	0.028±0.004
NANAMENOKI	0.74	0.028±0.001
YABUTSUBAKI	0.86	0.027±0.003
BIWA	0.75	0.026±0.005
KAKI	0.74	0.023±0.002
POPLAR	0.45	0.022±0.002
SHIRAKASHI	0.89	0.022±0.001
BUNA	0.59	0.022±0.002
RYÖBU	0.76	0.022±0.002
HÖNOKI	0.47	0.020±0.001
NEJIKI	0.76	0.020±0.002
AOHADA	0.76	0.019±0.001
KUMANOMIZUKI	0.70	0.017±0.003
MAKANBA	0.72	0.015±0.001
Heartwood		
POPLAR	0.43	0.031±0.002
BUNA	0.60	0.014±0.001
HÖNOKI	0.48	0.014±0.001
Ring-porous wood		
Sapwood		
	r_a	b
ENOKI	0.78	0.037±0.002
YAMAGUWA	0.67	0.035±0.003
ENJYU	0.70	0.030±0.005
AKAMEGASHIWA	0.57	0.027±0.003
NEMUNOKI	0.62	0.027±0.002
AKINIRE	0.72	0.025±0.001
KONARA	0.71	0.024±0.002
KUNUGI	0.88	0.024±0.002
MIZUNARA	0.57	0.023±0.004
TAKANOTSUME	0.54	0.019±0.002
KENPONASHI	0.60	0.019±0.001
KIHADA	0.48	0.017±0.001
SHIOJI	0.47	0.015±0.001
YACHIDAMO	0.50	0.014±0.001
Heartwood		
MIZUNARA	0.67	0.018±0.001
ENJYU	0.66	0.017±0.002
SEN	0.50	0.019±0.001
KURI	0.46	0.013±0.001
YACHIDAMO	0.60	0.014±0.001

Letters; same as Table 2.

Table 4 Slope of the regression line drawn between the water uptake of sapwood and the square root of time. Penetration to the tangential direction by capillary rise method.

Diffuse-porous wood		
	r_a	b
TOCHINOKI	0.54	0.061±0.020
FUU	0.71	0.030±0.005
YABUTSUBAKI	0.87	0.025±0.003
RYÖBU	0.76	0.025±0.003
HANNOKI	0.57	0.024±0.007
YAMAZAKURA	0.71	0.023±0.003
NEJIKI	0.79	0.023±0.002
MUKUNOKI	0.68	0.020±0.001
MOCHINOKI	0.57	0.021±0.002
BIWA	0.75	0.018±0.002
AOHADA	0.76	0.018±0.003
HÖNOKI	0.47	0.018±0.002
SOYOGO	0.75	0.017±0.003
BUNA	0.55	0.017±0.002
POPLAR	0.48	0.013±0.003
Ring-porous wood		
	r_a	b
ENOKI	0.75	0.029±0.002
KONARA	0.83	0.027±0.004
NEMUNOKI	0.63	0.024±0.003
MIZUNARA	0.59	0.023±0.002
AKAMEGASHIWA	0.57	0.022±0.001
YACHIDAMO	0.48	0.018±0.001
TAKANOTSUME	0.54	0.017±0.001
ENJYU	0.70	0.016±0.002
KUNUGI	0.85	0.014±0.001
AKINIRE	0.74	0.014±0.001

Letters; same as Table 2.

ネジキ、ハンノキなどがあるが、ここに供試した環孔材には一種もなかった。さて Photo. 2-b の着色部を拡大すると (Photo. 2-c, -d, -e), 道管だけでなくその周囲細胞さらには道管から離れた位置にある一部の仮道管にも良好に流動しているのがわかる。これらの仮道管は厚壁だが染料で着色された多数の有縁壁孔が認められ、この部分を溶液が通過していることが示唆される。Photo. 3 はホオノキである。この場合、年輪内の道管位置に関係なくほぼランダムに流動している。この他、散孔材の中には年輪内全面にわたって小径で階段せん孔板を持つ道管がほぼ均一に多数分布し、かつ道管に限らず周囲の軸方向要素へも道管と同程度に流動するため、全体としては均一に浸透しているように見える樹種もある。フウ、モチノキ、ナナメノキ、ソヨゴ、アオハダがそれである。以上の浸透型式の他

に晩材部最外層の数列の軸方向細胞(主として仮道管)にも易浸透する樹種として、ハンノキ (Photo. 4), ソヨゴなどがあげられる。クスノキ, タブノキ, キリ, キハダの辺材は著しく難浸透で, 着色部は木口面から1~2細胞長の範囲に留まっていた。以上, 広葉樹辺材L方向への毛管上昇経過をタイプ別にまとめると Table 5 のようになる。これを見ると従来からの通説どおり道管へ率先浸透する樹種が多いが, 一部にはそれ以外の長軸方向細胞 (主として仮道管) も道管と同程度かあるいはそれ以上に流動する樹種もある。均一浸透型を除き他はいずれも不均一に流動しており毛管上昇過程においては多数の細胞が未流動のまま取り残された。

道管に率先浸透する樹種についてL方向の b 値と道管要素率との関係をプロットしたのが Fig. 4 である。ビワ, トチノキを除けばやや正の相関が認められる ($r=0.70$ $n=33$) もの、バラツキがかなり大きい。単なる道管量ではなくその中の有効道管量あるいは道管以外の細胞の寄与がかなり大きいものと考えられる。道管内にチロースが存在する時、流動が大きく阻害されることは周知の事実である。Table 2 中の難浸透材はいずれも辺材道管にもチロースが形成されていた。特に環孔材の孔圏道管は樹皮側から1~2年輪目ですでにチロースで充てんされている場合が多かった。しかしチロースがまだ形成されていないように見える樹種であっても道管への流動は必ずしも良好ではない。これらの材にあって毛管上昇の先端が道管要素のどの部分で留まっているかをホオノキ, カキノキ, シラカシ, マカンバ, ヤマザクラ, リョウブ, ネジキ, ヤブツバキ, ハンノキ, ポプラ, フウの計11種について調

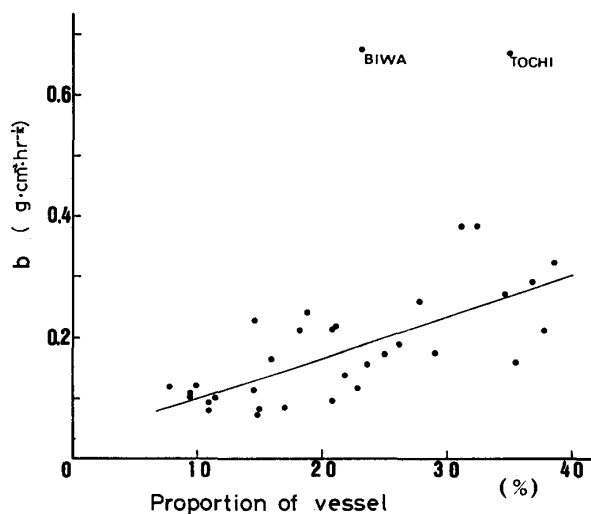


Fig. 4. Relationship between the slope (b) of regression line for longitudinal penetration by the capillary pressure and the volumetric proportion of vessel in wood.

Photo. 1~4 Capillary rise of the dye solution to the longitudinal direction for 30 minutes.

Photo. 1 Cross sections of RYŌBU sapwood. Height from the base: a ; 5.0 mm, b ; 9.5 mm.

Photo. 2 Sapwood of YABUTSUBAKI. Height from the base: a ; 3 mm, b ; 5.5 mm. c : enlarged view of a part of b . d and e : enlarged view of c . Note the staining of bordered pits of tracheids.

Photo. 3 Sapwood of HŌNOKI. Height from the base: a ; 3 mm, b ; 5.5 mm.

Photo. 4 Sapwood of HANNOKI. Height from the base: 10 mm. b : enlarged view of the annual ring boundary of a . Note the staining of bordered pits.

Photo. 5 Position of penetration front in vessel element at the capillary rise process. a : sapwood of RYŌBU. b : sapwood of HŌNOKI.

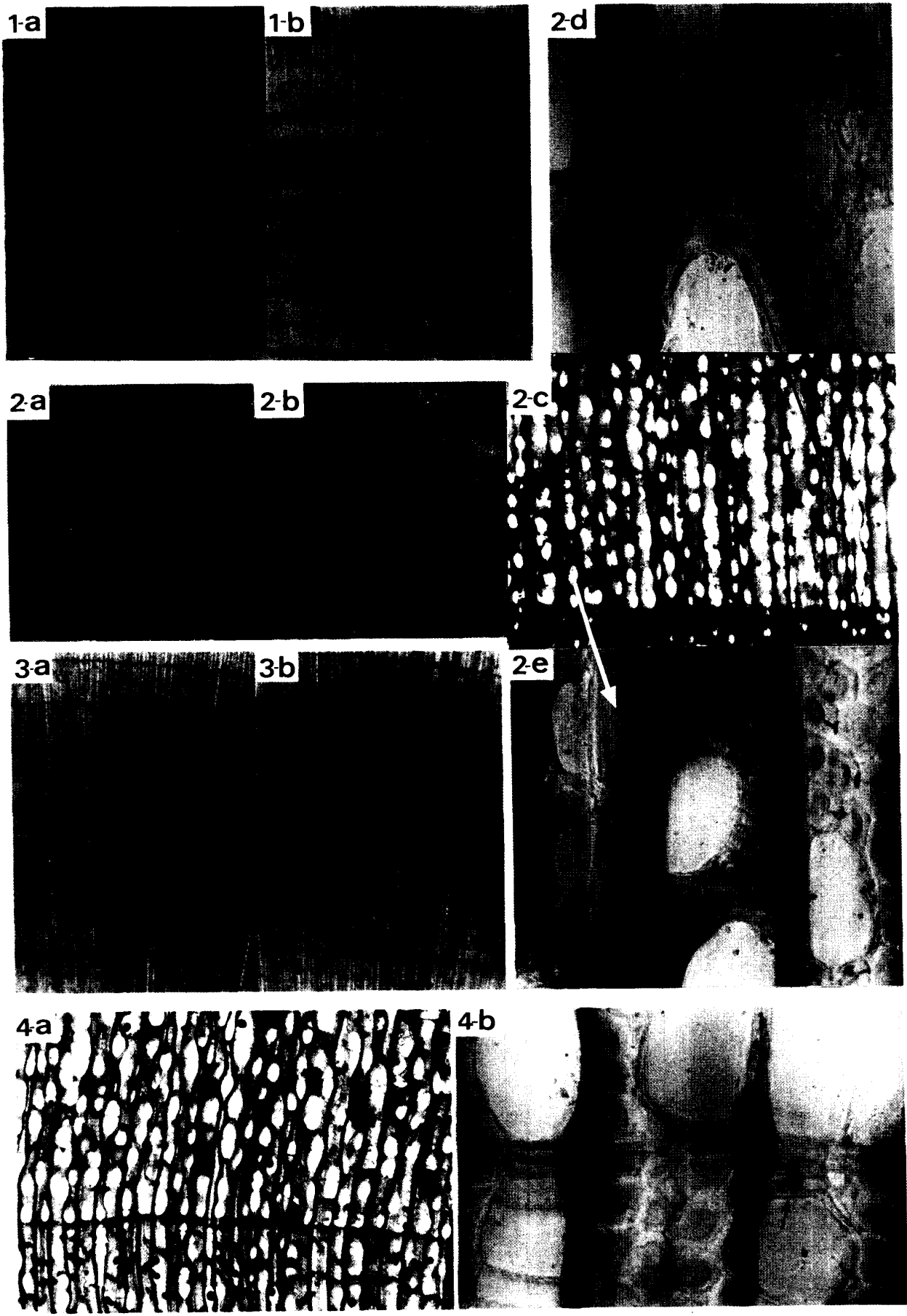
Photo. 6 Penetration of the dye solution to the tangential direction of YABUTSUBAKI sapwood. Penetration time: 4 hrs.

Photo. 7 Penetration of the dye solution into KONARA under the vacuum evacuation and subsequent atmospheric pressure. S. W: sapwood, H.W: heartwood.

Photo. 8 Penetration of the dye solution into RYŌBU sapwood by the vacuum impregnation. Perfect penetration except a small number of cells in the initial earlywood.

Photo. 9 Penetration of the dye solution into AKINIRE sapwood by the vacuum impregnation. Note the selective penetration into vessels of latewood, except a few annual rings at the outermost position of xylem in which all vessels were penetrated.

Photo. 10 Penetration of the dye solution into HŌNOKI heartwood by the vacuum impregnation. Note the selective penetration into vessels and the vasicentric cells around the latewood vessels.



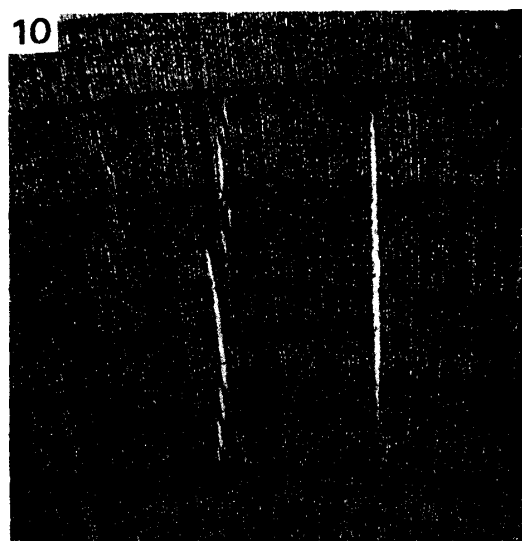
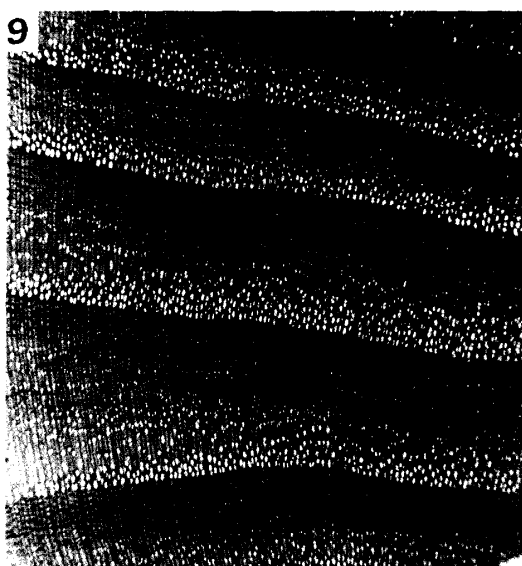
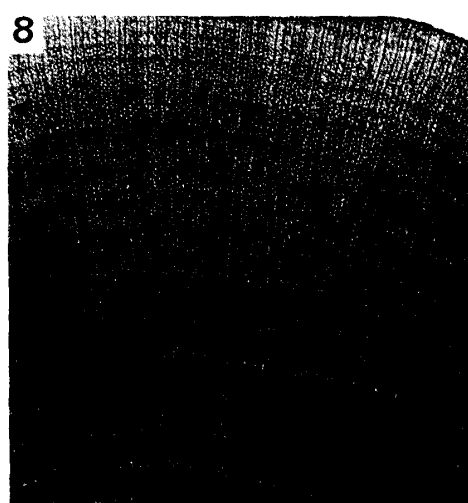
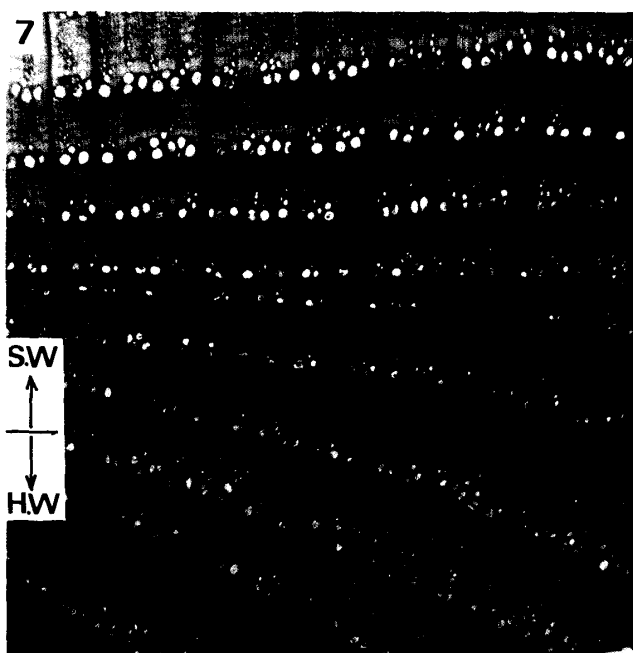
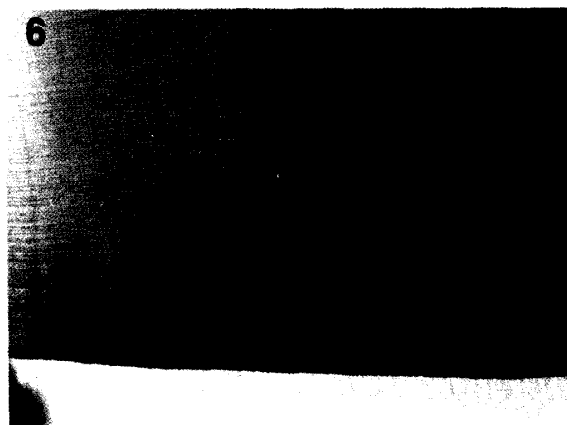


Table 5 Types of selective penetration to the longitudinal direction of sapwood in the capillary rise process.

	Diffuse-porous wood	Ring-porous wood
Vessels in latewood	RYŌBU, BIWA, KATSURA(H), BUNA, KUMANOMIZUKI, YAMAZAKURA*1	AKINIRE, MIZUNARA, KEYAKI, ENOKI, KONARA, AKAMEGASHIWA, KUNUGI, YAMAGUWA, NURUDE, NISEAKASHIYA, NIWAURUSHI, SEN(H), KENPONASHI
Vessels in earlywood	NEJIKI, HANNOKI, ISUNOKI, YABUTSUBAKI*2, (POPLAR)	
Vesels (at random)	HŌNOKI, KAKI, TOCHINOKI, POPLAR, YAMAURUSHI, MAKANBA, MUKUNOKI, SHIRAKASHI, ARAKASHI, AKAGASHI, ONIGURUMI, UWAMIEZUZAKURA*1	NEMUNOKI, YACHIDAMO, SHIOJI, ENJYU, TAKANOTSUME
Uniform penetration to all axial cells	FUU, MOCHINOKI, SOYOGO, NANAMENOKI, AOHADA (ISUNOKI)	
Outermost cells of latewood	(HANNOKI), (SOYOGO), (FUU), (NANAMENOKI), (AOHADA), (TOCHI), (MOCHINOKI)	(NURUDE)
Non-penetration	KUSUNOKI, TABUNOKI	KIRI, KIHADA

H: Heartwood.

*1: In addition, some of tracheids were preferentially penetrated.

*2: In addition, vasicentric cells were preferentially penetrated.

(): Secondary feature.

べたところほとんどの場合せん孔板部で停止していた (Photo. 5)。毛管圧にもとづく流動過程においてはチロースのみならずせん孔板の存在が障害となるのは明白であろう。同一年輪内での部位による道管の浸透性の差については、チロースの分布量の差だけでなくせん孔板の形状の違いについての検討が必要であろう。また道管内壁面と浸透液体との「ぬれ」が結果に影響を及ぼすと考えられるが、この点については実験方法も含め今後さらに検討が必要である。

R方向の浸透には放射組織の寄与が期待されたが、現実にはトチノキを除き難浸透で、4時間後でも数細胞長の範囲にすぎなかった。T方向についても4~9時間経過後で0.1~0.4mm程度しか流動していなかった。繊維の目切れによる影響を考慮すると、横方向への自然浸透はさらに狭い範囲に限定される。年輪内での位置による浸透性の差については多くの材で特定の

傾向は認められなかったが、なかにはヤブツバキのように早材部の浸透が晩材よりも良好な樹種もあった (Photo. 6)。

4. 減圧注入における流動範囲

すでに Fig. 3 において心・辺材間に注入量に差のあることを示したが、組織内の着色範囲も著しい差が認められた (Photo. 7)。まず辺材についてはほぼ完全に浸透するもの (Photo. 8)、道管から離れた位置にある木繊維は未流動だがそれ以外は流動しているもの (ブナ、マカンバなど)、晩材道管およびその周囲細胞にのみ流動しているもの (Photo. 9) などがある。一方、心材ではポプラ、ミズナラ、シオジ、ヤチダモは比較的広範囲に浸透していたがその他の樹種は概して不良 (Photo. 10) でクスノキにいたっては着色は外表面に接した部分のみに限られていた。以上をまとめると Table 6 のようになる。減圧注入しても組織全体に完全流入する

Table 6 Penetration range of the dye solution in the wood tissue under the impregnation by vacuum evacuation and subsequent atmospheric pressure.

	Sapwood	Heartwood
Perfect penetration.	TOCHI, BIWA, ISUNOKI, FUU NEJIKI, MOCHINOKI, HANNOKI, AKAMEGASHIWA	
Perfect penetration, except some cells of the initial earlywood.	RYŌBU, HŌNOKI, NANAMENOKI, UWASIZUZAKURA	
Perfect penetration, except a part of latewood.	YABUTSUBAKI	
Perfect penetration, except some fibers at a long dis- tance from vessel, and mul- tiseriate ray.	SOYOGO, POPLAR, MAKANBA, YAMAZAKURA, YAMAURUSHI, AOHADA, BUNA, KAKI, KONARA, TAKANOTSUME, ONIGURUMI, MIZUNARA, SHIRAKASHI, ARAKASHI, AKAGASHI, ENJYU, KUNUGI, YACHIDAMO, SHIOJI	POPLAR, MIZUNARA, SHIOJI, YACHIDAMO
Penetration into vessels, vasicentric cells, and axial cells at the outermost posi- tion of latewood.	NIWAURUSHI, NURUDE	YAMAZAKURA, UWAMIZUZAKURA, TOCHI, NEMUNOKI, MAKANBA, ISUNOKI, KURI, BUNA, HŌNOKI, KATSURA, ONIGURUMI
Penetration into vessels and vasicentric cells.	MUKUNOKI, KEYAKI, ENOKI, KUSUNOKI	MUKUNOKI, ENJYU
Penetration into the vessels of latewood.	YAMAGUWA, AKINIRE, KIHADA, NISEAKASHIYA	SEN, KONARA
Penetration into a few ves- sels.		TABUNOKI, KEYAKI, AKINIRE, KIHADA, NURUDE, YAMAGUWA, NISEAKASHIYA
Penetration into the axial cells at the annual ring boundary.	KIRI	
Non-penetration.		KUSUNOKI

樹種は比較的少なく、組織内には道管から離れた位置にある木繊維や多列放射組織を中心に多数の細胞が未流動のまま取り残されることが明らかにされた。したがって Cu や Cr (VI) イオンのように湿潤細胞壁内に拡散移動しうる溶質を使用した場合、壁を通る溶質拡

散の関与しうる余地が木材組織内にかなり残されているといえよう。

最後に実験にご協力いただいた西山毅氏（現大建工業 KK）に厚く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) Yata, S., J. Mukudai and H. Kajita (1979): Mokuzaï Gakkaishi, **25**, 171~176.
- 2) —, —, —(1981): *ibid.*, **27**, 761-766.
- 3) —, —, —(1981): *ibid.*, **27**, In press.
- 4) 貴島恒夫・林 昭三(1960): 木材研究, **24**, 33~45.
- 5) Stone, J. E. and H. V. Green (1959): Tappi, **42**, 700~709.
- 6) Wardrop, A. B. and G. W. Davies (1961): Holzfor-schung, **15**, 129~140.
- 7) Rudman, P. (1965): Holzfor-schung, **19**, 5~13.
- 8) 堀池 清・基太村洋子(1974): 木材工業, **29**, 188~193.
- 9) Hergt, H. F. A. and G. N. Christensen (1972): Holzfor-schung, **26**, 26~31.
- 10) Rosen, H. N. (1974): Wood and Fiber, **5**, 275~287.
- 11) Haishi, T. (1980): Mokuzaï Gakkaishi, **26**, 510~518.
- 12) 林 昭三・西本孝一(1965): 木材研究, **35**, 33~43.
- 13) 葉石猛夫・中野達夫(1977): 農林水産省林試研報, **291**, 117~167.

Summary

The flow paths of liquids into air-dried hardwoods were studied using penetrating water or a 0.5% aqueous solution of Direct Sky Blue 6B with the capillary rise method and the vacuum impregnation method.

In the longitudinal penetration by the capillary rise method, penetration rates into the fifty hardwoods showed wide variations (Table 2). Sapwood was more permeable than heartwood, except ENJYU, POPLAR, SHIOJI and YACHIDAMO. Liquid flow into the wood tissue was so irregular that many cells remained without penetration. Types of preferential penetration in longitudinal direction were classified into six groups (Table 5). Penetration to the radial and tangential directions were far less than

that to the longitudinal direction (Table 3 and 4). Ray tissue, except that of TOCHINOKI, was not effective in facilitating the radial penetration.

In the penetration method using vacuum evacuation and subsequent atmospheric pressure, volume of the impregnated solution in sapwood was entirely dependent on the specific gravity of wood except KIRI. In heartwood the volume of the impregnated solution had no correlation to the specific gravity of wood (Fig. 3). After the vacuum impregnation, penetration range in the wood tissue showed wide variations with species (Table 6). In many species, penetration into fiber bundles and multiseriate rays were very difficult.