ダグラスファー材の通水性に関する研究[†]

近 藤 久 晴* 金 川 靖**

Study on Water Permeability of Douglas-Fir

by

Hisaharu KONDOH and Yasushi KANAGAWA

(Faculty of Agriculture, Nagoya University, Nagoya)

Axial water permeability was measured on the specimens of coast and mountain types of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* FRANCO) sap- and heartwood, in green and air dried conditions. The measurement was carried out on the water saturated specimens of various lengths from 0.4 to 3.2 cm in the fiber direction. Conducting tracheids, which were labeled with 0.5% water solution of Rhodamine B fluorochrome through the wood specimens, were observed with a reflected light fluorescence microscope in order to make clear the path-way, and the conducting area in the cross section of specimen was also measured on the specimens of various lengths.

Most of sapwood specimens in green were quite permeable and their permeability was constant in any specimen length. However, the air dried sapwood specimens of coast type showed very low permeability 3.5×10^{-2} darcy even in the specimen length of 0.4 cm, which corresponds to its fiber length. The permeability K in darcy decreased exponentially with increasing specimen length l in cm, as follows.

$$\log K = -0.19 \cdot l - 1.84$$

$$R^2 = 0.52$$

On the other hand, for the air dried sapwood specimens of mountain type, the one with specimen length of 0.4 cm gave the same high permeability as that of green condition, and the permeability was expressed by the following equation (see Fig. 2),

$$\log K = -0.63 \cdot l + 0.52$$

$$R^2 = 0.87$$

These results agree with Bramhall's consideration.

In green sapwood, water conduction occurred in the whole early wood and a part of late wood. In drying, pits in early wood were blocked by aspiration and became to be impermeable. However, conducting tracheids in late wood, which has low permeability even in green, still remained under a air dried condition. Therefore, in air dried sapwood, most of the conducting tracheids were in late wood (see Fig. 5 (a)(b)).

The measured values of conducting area for the specimens of various lengths did not correspond to those calculated from the permeability according to Bramhall's equation. The reduction in conducting area e^{-bt} , as Bramhall said, should be understood as the reduction in number of conducting pits, because, for example, air dried sapwood of mountain type had the measured conducting area of 50% against 10% calculated from b value of 1.46. The former represented the total area of tracheids labeled with fluorochrome even if their permeability was very low, while the latter corresponded to the conductivity in pits between tracheids.

(Received Nov. 30, 1982)

キー・ワード：ダグラスファー，通水性，通水経路，壁孔閉鎖

1 緒 言

木材中の液体・気体の移動の容易さ（透過性）に関

する知見を得ることは、防腐・防虫、乾燥等を有効に行うために重要である。木材の透過性については、従来から多くの研究がなされており、気体を対象とした通気性については測定が容易で複雑な要因が入り難いため多くの測定例と結果が発表されている。しかし、

[†] 原稿受理 昭和57年11月30日

* 名古屋大学農学部 名古屋千種区不老町

** 正会員 名古屋大学農学部 名古屋千種区不老町

Table I. Properties of materials.

Douglas-fir		Age (years)	Diameter (cm)	Heartwood diameter (cm)	Specific gravity in air dry	Fiber length (mm)	Ave. width of annualring (mm)	Latewood ratio (%)	Moisture content	
									Green (%)	Saturated (%)
Coast type	Sapwood	35	22	14	0.43	3.5	2.9	27	98.0	234
	Heartwood				0.43	3.3	4.0		38.5	
Mountain type	Sapwood	99	24	17	0.54	4.4	1.3	24	71.0	176
	Heartwood				0.54	4.1	1.3		40.5	

通気経路については標識が困難なためそれを確認するまでには至っていない。通水性の測定に関しては、水に含まれる固体微粒子、気泡による通水経路の閉鎖などが生じ、測定初期に流率が減少する傾向があり、測定値のばらつきが大きく、研究者によって測定方法は様々である。しかし、通水性測定の利点は、水と近い性質をもつ染料や蛍光色素を含む水溶液を用い、その通水経路を標識することが容易で、通水経路や面積と通水係数との関連を検討することができる。最近では、種々の染料の選択的吸着などの報告もあり、目的に合致した染料を選択できる。

ダグラスファー材はカラマツ材と共に防腐薬剤の浸透が悪く製材の防腐処理規格 (JAS) で防腐 3 種処理、すなわち防腐剤の浸透度の緩和規定が暫定的に適用されている。したがって、本研究では供試材としてダグラスファー材を用い、通水性および通水経路を明らかにすることを目的とした。この樹種は生育場所によってコーストタイプ、マウンテンタイプと大別されており、特に年輪幅の違いは著しい。本研究では、辺材・心材における繊維方向の通水係数を、生材・乾燥材について、繊維方向長さとの関連で求め、また、蛍光色素の希薄水溶液の通導部位を蛍光顕微鏡で観察し、各条件での通水経路の差異を明らかにした。針葉樹では、仮道管が主要な経路となっており、仮道管から仮道管への通水経路として、有縁壁孔が主な役割を示している。したがって、壁孔の閉鎖が通水性に与える影響は大きく、壁孔閉鎖の起る条件についても検討した。

2 実験方法

2・1 供試材

供試材にはダグラスファー材 (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB) FRANCO) を用いた。生材状態の丸太から試験材を得たコーストタイプ、マウンテンタイプの諸性質を Table I に示す。試験材の乾燥条件として、繊維方向 45 cm の板材を気乾状態にし、乾燥後種々の繊維方向長さに木取ったもの (乾燥材と呼ぶ)、および、生材状態で試験時の繊維方向長さに

木取った後気乾状態にしたもの (木取後乾燥材と呼ぶ) の 2 種類の乾燥試験片を用いた。定常状態の通水係数を求めるため、乾燥試験片および生材試験片共に、減圧注入により飽水状態にした後、繊維方向長さが 0.4 cm から 0.4 cm ごとに 3.2 cm までの 8 段階の試験片を測定に供した。一度測定した試験片は、液体中の固体微粒子・気泡のつまりが予想されるため、測定には常に新しい試験片を用いた。

2・2 通水性測定

繊維方向通水性測定装置を Fig. 1 に示す。断面半径 1.0 cm の治具に試験片を固定し、圧力差 0.8 気圧の下で蒸留水を加圧透過させ、流量計で単位時間あたりの流量 (流率) を測定する。ただし、流率が 10 ml/min 以下のものでは、流量計では十分な精度が得られないため、メスシリンダーにより測定した。また、ダグラスファー材においては、繊維方向へ水を加圧通水させた場合、横方向へはほとんど通水しないので、側面はシールすることなく測定した。流率は、測定時間と共に低下することが良く知られ、前述したような液体中の固体微粒子や気泡による通路閉鎖が原因とされている。従来、流率が安定した時点での値を便宜的に用い通水係数を求めている場合が多いが、この値は木材の性質を示す値とは異なる可能性がある。通水係数の測定に際し、通水しはじめてから 1 分以前では流率はまだ不安定で、また、5 分以降では、流率が大きく低下する場合が多い。したがって、本報告では液体中の微粒子等による 2 次的な通路閉鎖を含まない値として

Fig. 1. Apparatus for measuring water permeability of wood.

2～3分の平均流率を採用し、この値を定常状態とみなして Darcy 則から通水係数を算出した。また、この流率は、流出しはじめてから5分間の平均流率とほぼ一致した。

2・3 蛍光顕微鏡による通水経路の観察

各試験片に前述の装置を用い、蛍光色素ローダミンBの0.5%水溶液を同条件で加圧透過させ、木口面、板目面、まさ目面それぞれ20 μ mのマイクローム切片を作製し、蛍光顕微鏡で観察した。蛍光色素ローダミンB水溶液は選択的吸着性は弱く、各通水部均等に染色する。また、ローダミンBは、発蛍光に必要な吸収領域が540nm、発蛍光は625nmをピークとする蛍光色素である。また、蛍光顕微鏡は標本に対して効率の良い照明が可能な落射型を用いた。

2・4 通水面積率の測定

前項と同様な方法で、繊維方向長さ0.8, 1.6, 2.4cmの試験片に蛍光色素水溶液を加圧透過させ、通水に関与した部分を、2.4cm試験片では流出端付近の断面で求め、また、0.8, 1.6cm試験片では半径方向の6断面での流出端付近の通水部分の割合の平均値から、通水面積率を求めた。

2・5 壁孔開放率の測定

生材・乾燥材について、厚さ20 μ mの板目面マイクローム切片を作製し、その春材部分を透過光学顕微鏡で観察し、有縁壁孔対200個以上について調べ、壁孔の開放率を求めた。

3 結果と考察

3・1 繊維方向長さとの通水性

コーストタイプ、マウンテンタイプ各辺材の通水性

Fig. 2. Influence of specimen length on permeability in sapwood.

測定結果を Fig. 2 に示す。生材では、通水係数は両タイプの材共に試験片長さ、すなわち繊維方向長さ0.4cm および0.8cm ではわずかに高い値を示すものの、1.2～3.2cm の範囲では繊維方向長さによらず、約 1×10^0 darcy で一定と考えてよい。しかし、乾燥材では両タイプの材で相当異った結果が得られている。コーストタイプ乾燥材では、繊維方向長さ0.4cm でも 5×10^{-2} darcy と非常に低く、測定結果のばらつきを考慮すると、繊維方向長さの増大に伴って、約 1×10^{-2} darcy ではほぼ一定かわずかに低下すると判断されるのに比べ、マウンテンタイプでは、繊維方向長さ0.4, 0.8cm の試験片では生材と同程度の 2×10^0 darcy を示し、繊維方向長さの増大に伴って急激に低下する。乾燥に伴う通水性低下の主要原因を通水性を支配する壁孔における通路閉鎖と考え、この両タイプで壁孔閉鎖の起りやすさに差のあることが予測される。

これらの差異をさらに明らかにするため、木取後乾燥試験片について通水係数を測定した。この試料では木口面に露出する一端を切断された仮道管での乾燥がどの程度内部の仮道管での乾燥に影響を及ぼすかを調べることになる。両タイプの測定結果を Fig. 2 の中に併せて示す。辺材部の繊維長は両タイプ共に0.4cm 前後であるため、繊維方向長さ0.4cm の試験片ではほとんどの仮道管が一端を切断された状態で乾燥され、壁孔部のみからの水分の蒸発による壁孔閉鎖は起り難い。これは通水係数が生材の値と一致することからも裏付けられる。繊維方向長さ0.8cm 以上では、先の乾燥材の結果と同様に両タイプで大きな差異が認められた。マウンテンタイプでは繊維方向長さ3.2cm の木取後乾燥材においても通水係数は低下せず、生材のそれよりもわずかに高いものの、変化の傾向は生材と一致し、この範囲の木取後乾燥材では壁孔閉鎖は起っていないと判断できる。一方、コーストタイプでは繊維方向長さが1.2cm 以上になると通水係数は急激に低下し、3.0cm 程度で乾燥材と同程度の壁孔閉鎖が生じるものと思われる。

一般に、壁孔閉鎖の発生条件として(1)壁孔膜の小孔が十分に小さい。(2)細胞内腔が水で満たされ、気泡がなく、かつ壁孔部のみから乾燥する、などが主にあげられている。本報告で用いた両タイプのダグラスファー材では、生材含水率と、全乾比重から求められる飽水含水率の比(飽水度)を比較すると大差はなく、この値を一仮道管内での飽水の程度ではなく、水で満たされた仮道管の割合と考えれば、上述の壁孔閉鎖の第2の発生条件において差は見出せない。また、走査型電子顕微鏡からは壁孔膜小孔の大きさを判断することは難しく、有縁壁孔対の形状的な差異は認められない。

Table II. Non-aspirated pit ratio.

Douglas fir			Non-aspirated pit ratio (%)
Coast type	Sapwood	Green	75
		Dry	25
	Heartwood		5
Mountain type	Sapwood	Green	76
		Dry	68
	Heartwood		1

Fig. 3. Influence of specimen length on permeability in heartwood. Marks are the same as in Fig. 2.

しかしながら、Table II に示すように辺材においては乾燥状態で壁孔開放率には大きな差が認められる。

Fig. 3 に心材の生材および乾燥材での通水係数を示す。マウンテンタイプでは、乾燥に伴ってわずかに通水係数は低下する傾向が認められるが、全体的にみれば心材においては、生材・乾燥材で通水係数に差異は認められない。すなわち、辺材でみられたように、乾燥によって壁孔閉鎖が起ることはなく、心材化の時点で壁孔閉鎖が起ると考えるべきであろう。また、Krahmerらは、ダグラスファー材の乾燥材において、心材は辺材の 1/34 の通水係数を示しているが、本測定では繊維方向長さ 3.2 cm において乾燥材での通水係数の比率はコーストタイプで約 1/2、マウンテンタイプで約 1/16 となり、タイプによって異なる。

3・2 通水経路の観察

コーストタイプ、マウンテンタイプで示される乾燥に伴う通水係数低下傾向の大きな相違を明らかにするために、染料（ダイレクトスカイブルー）および蛍光色素（ローダミンB）を用いて通水部分をラベルして、肉眼的に、また、蛍光顕微鏡観察によって調べた。

繊維方向長さ 2.4 cm の試験片の流出端付近の断面

での通水部分の面積率を求めると、コーストタイプ、マウンテンタイプの生材では、それぞれ75%、90%であるのに対し、乾燥材では約10%、20%と大幅に低下する。しかしながら通水性の急激な低下は単にこの通水部分の面積率の低下だけでは説明できない。

よく知られている Poiseuille 則によれば、流率はここで言う通水部分の面積率の1乗に、また、通水経路半径の4乗に比例する。したがって、乾燥に伴って通水性が1/100に低下する (Fig. 2) には、通水部分の面積率が低下すると同時に、通水部分での有効半径が小さくなることなどを考慮する必要がある。

Bramhall によれば、木材の繊維方向における通水係数は試験片長さの増大に伴って指数的に低下し、この原因として透過断面における有効面積が壁孔閉鎖によって減少するためとしている。したがって、繊維方向長さ l での流率 dQ/dt は次式で表される。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{K_0 A_0 e^{-bl} \Delta P}{l \eta} \quad (1)$$

ここに、 K_0 は $l=0$ における通水係数、 A_0 は試験片の外形的断面積、 b は正の定数、 ΔP は試験片両端の圧力差、 η は水の粘性である。以上の関係から、長さ l 、有効断面積 A の場合の通水係数 K は次式で示される。

$$K = K_0 \frac{A}{A_0} = K_0 e^{-bl} \quad (2)$$

$$\log K = \log K_0 - 0.434 \cdot bl$$

Fig. 2, 3 で示した通水性と繊維方向長さとの関係を求めると Table III となる。

Table III. Linear regression equation on water permeability through Douglas-fir in sapwood

Douglas-fir		Linear regression equation	R^2
Coast type	Green	$\log K = -0.05l + 0.14$	0.20
	Air dried	$\log K = -0.19l - 1.84$	0.52
	Dried in specimen size	$\log K = -1.53l - 1.33$	0.97
Mountain type	Green	$\log K = 0.02l - 0.01$	0.01
	Air dried	$\log K = -0.63l + 0.52$	0.87
	Dried in specimen size	$\log K = -0.11l + 0.39$	0.30

マウンテンタイプ乾燥材を例に、式(2)から b を求め繊維方向長さに伴う通水に有効な断面積を、実測の通水面積率と比較すると Fig. 4 となる。図から明らかなように、実測された通水面積率は式(2)から得られる値に比べかなり大きい。例えば、繊維方向長さ 1.6 cm の試片では測定通水面積率は50%であるのに対し、式(2)から計算で求められる通水面積率は10%である。光学顕微鏡下で板目面の有縁壁孔対を観察すると、乾

Fig. 4. Difference of conducting area measured and that calculated with Bramhall's equation.

乾燥によって壁孔閉鎖は二つの仮道管の接続部分のすべての壁孔で生じるとは限らず、度々数個の壁孔は閉鎖されずに残っている。Table II に示した壁孔開放率は、完全に閉鎖および開放された仮道管の数に比例する数値ではない。通水面積率を実測する際には、一部の壁孔での閉鎖が生じて、通水性は低下するとしても通水可能な仮道管として評価され、春夏材での仮道管径を考慮すれば、実測値は通水に寄与した仮道管数に対応する。以上の観点から、式(2)における e^{-bl} は有効断面積 A/A_0 と解すべきでなく、 $l=0$ の断面での通水に有効な壁孔の数 N_0 と試験片の流出端における通水に寄与した壁孔数 N との比 N/N_0 と考えるべきであろう。これは、針葉樹の繊維方向の通水性は仮道管内腔ではなくその壁孔によって支配されるためである。

蛍光顕微鏡下で細胞レベルでの透過経路の確認を行った。木口面での観察結果の一例を Fig. 5 に示す。実際には蛍光色素によってラベルされた部分は、グリーン励起では暗視野に赤色の蛍光として観察される。軸方向樹脂道は通水に寄与せず、放射組織もほとんど寄与していない。したがって、繊維に直角方向への通

(a) Green sapwood; (b) Air dried sapwood; (c) Air dried heart-coast type.

Fig. 5. Conducting tracheids labeled with fluorochrome.

水部分の広がりほとんど認められなかった。両タイプに共通して、生材状態では春材部分の全部分および夏材部分の一部に通水部が認められ (Fig. 5 (a)), 乾燥材においては春材部分の通水部はほとんど認められず、夏材の一部に通水部が認められる (Fig. 5 (b)). 生材と乾燥材を比較すると、乾燥に伴って壁孔閉鎖は主に春材部で起り、夏材部の壁孔は乾燥過程でも壁厚や壁孔腔の形態などから壁孔閉鎖を起さず、通水部として残ると結論できる。ただし、マウンテンタイプの材では、度々乾燥材の春材部分でも壁孔閉鎖が起らず、通水に関与している場合が認められた。

心材においては、生材、乾燥材共に通水部分の変化は認められず、夏材を中心にその全体または一部に通水部分が認められ (Fig. 5 (c)) 通水性の測定結果と一致している。

以上の結果、生材では春材部仮道管を中心に通水するのに対し、乾燥に伴って春材部の通水面積率が低下すると共に通水に主に関与する細胞が夏材部仮道管に変化してくる。すなわち、繊維方向の通水性を支配するのは仮道管の壁孔部であり、春材部に比べ夏材部では有縁壁孔部の通水に対する抵抗が大きいことが予測される。

4 結 論

コースト、マウンテンタイプのダグラスファー辺心材について通水性を測定し以下の結論を得た。

(1) 両タイプの生の辺材では仮道管長以上の繊維方向長さでは約 1×10^0 darcy と高い通水係数を示し、繊維方向長さにかかわらずほぼ一定の通水係数を示す。乾燥した辺材では両タイプによって傾向を異にし、コーストタイプ 0.4 cm 試験片の通水係数は 3.5×10^{-2} darcy と非常に低く、それ以上では繊維方向長さの増大に伴い指数的にゆるやかに低下する。一方、マウンテンタイプでは 0.4 cm 試験片において生材と同様の通水係数を示したのち、繊維方向長さの増大に伴い指数的に急激に低下する。以上の結果は通気性測定で Bramhall が報告した結果と一致する。

(2) 両タイプ心材では、乾燥材、生材とも通水係数はほぼ一致し、辺材で認められた乾燥によって生じる壁孔閉鎖が生じていないものと判断できる。通水細胞の観察結果からも心材においては、心材化の過程で春材部に壁孔閉鎖が生じるものと推測される。

(3) 通水に関与する細胞は生の辺材では春材部全体と夏材の一部の仮道管である。乾燥材においては、繊維方向長さが十分に長い場合乾燥過程で生じる壁孔閉鎖によって春材部の大部分の仮道管は通水に関与しなくなり、通水係数は低いながらも夏材の一部が通水経路として残る。しかしながら、繊維方向長さが短くなるにつれ、春材部の一部も次第に通水に関与するよう

になる。また、垂直樹脂道は全く通水には関与せず、放射組織も繊維方向通水係数にはほとんど寄与しない。

(4) 繊維方向長さの増大に伴って、針葉樹材繊維方向の通気係数はその有効断面積の減少に比例して低下するとされている (Bramhall 1971) が、種々の長さの試験片断面での通水面積率を求めると、通水係数の低下から計算される有効断面積と一致しない。したがって、通水係数の低下は通水面積率の低下と共に通水部分の仮道管自体の通水性の低下を同時に考えざるを得ず、繊維方向長さの増大に伴って通水に関与する壁孔の数が減少すると考えるべきであろう。仮道管間の壁孔は、乾燥後においてもその開口数は大幅に減るものの、閉鎖せずに残るものが顕微鏡観察で認められ、この考え方の裏づけとなる。

本研究を行うに当たり、日常的に適切なお助言をいただいた名古屋大学農学部寺沢真教授および木材物理学研究室の皆様にご心から感謝いたします。なお、本研究

の一部は昭和57年度文部省科学研究費補助金 (試験研究 代表者 寺沢真) によって行った。

(昭和57年4月1日 第32回日本木材学会大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 大越 誠, 中戸莞二, 佐道 健, 木材学会誌, **22**, 54 (1976).
- 2) 基太村洋子, 色材, **52**, 389 (1979).
- 3) 貴島恒夫, 林 昭三, 木材研究, **24**, 33 (1960).
- 4) A. B. Wardrop and G. W. Davies, *Holzforschung*, **15**, 129 (1961).
- 5) C. A. Hart and R. J. Thomas, *For. Prod. J.*, **17**, 11, 61 (1967).
- 6) R. L. Krahmer and W. A. Côté, Jr., *Tappi*, **46**, 1, 42 (1963).
- 7) G. Bramhall, *Wood Sci. and Tech.*, **5**, 121 (1971).
- 8) G. L. Comstock, *For. Prod. J.*, **17**, 10, 41 (1967).