

樹幹横断面内の気体透過性への有縁壁孔閉鎖の関与： 自然乾燥されたスギ材とカラマツ材についての考察

松村, 順司
九州大学農学部林学科

堤, 壽一
九州大学農学部林学科

小田, 一幸
九州大学農学部林学科

<https://doi.org/10.15017/10893>

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 71, pp. 35-46, 1994-12-20. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

樹幹横断面内の気体透過性への有縁壁孔閉鎖の関与 自然乾燥されたスギ材とカラマツ材についての考察*

松村 順司**・堤 壽一**・小田 一幸**

抄 録

木材の気体透過性と組織・構造との関係を明らかにするために、有縁壁孔の閉鎖が気体透過率に与える影響を検討した。すなわち、自然乾燥されたスギ (*Cryptomeria japonica*) とカラマツ (*Larix leptolepis*) の心材部、移行材部、辺材部で、みかけの比透過率 K_g が測定された。そのあと、試験片内の平均圧の逆数と K_g との関係式から真の比透過率 K が求められ、これを供試試験片の気体透過率とした。他方、気体透過率が測定された試験片で、早材と晩材の有縁壁孔の閉鎖率が測定された。

樹幹横断面内の気体透過率の推移を検討した結果、スギ材とカラマツ材の両者で、心材部の気体透過率が低かった。さらに、心材部から移行材部および辺材部に向かうに従って、気体透過率が上昇する傾向が認められた。しかし、スギの移行材部の一部には、気体透過性が著しく悪い部位の存在が認められた。他方、樹幹横断面内の有縁壁孔の閉鎖率は、スギ材とカラマツ材の両者で、心材部から移行材部、さらに辺材部へと低下していく傾向が認められた。また、気体透過率と有縁壁孔の閉鎖率との関係を検討した結果、両者の間に有意な相関が認められることから、心材化に伴って生じる有縁壁孔の閉鎖が、気体透過性に大きく関与していることが明らかになった。しかし、スギの移行材部の一部で認められた低い透過性やカラマツ心材部内での気体透過率のバラツキは、有縁壁孔の閉鎖に加えて他の要因が気体透過率に関与していることが明らかになった。

キーワード：気体透過率，有縁壁孔閉鎖率，自然乾燥，心材，移行材，辺材，スギ，カラマツ

1. 緒 言

木材需要量の世界的増大への省資源による対処，および先進工業国における高機能化木材製品の実現が，いま木材科学の課題として問われている。そして，木材工業の次世代課題は，工業プロセスの効率化，高度な加工・処理技術の確立を問いかけている。すなわち，木材科学と木材工業は，資源問題と次世代に適應させる技術的課題とを抱えている。この研究は，両課題に応える対応策の一つとして，高度化した木材利用の工業に機能する木材材質評価法 (堤，1984；堤，1986) の確立を最終目的にしている。

木材工業あるいは製紙工業では，乾燥や薬液注入・処理など，木材内に液体や気体を透過させる処理が多く含まれている。ところが，この種の加工・処理への木材の適應性を気体透過率で評価する方法は，今のところ，確立しているとは言い難い。このような認識に

* MATSUMURA, Junji, TSUTSUMI, Juichi and ODA, Kazuyuki : Relationships of Bordered Pit Aspiration to Longitudinal Gas Permeability in a Given Stem Level : Preliminary Discussion on Air-Dried Wood of *Cryptomeria japonica* and *Larix leptolepis*.

** 九州大学農学部林産学科

Department of Forest Product, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

たつて、この研究は木材内の透過現象に関わる加工・処理性を気体透過率で評価するための基礎を確立し、ひいては気体透過率を材質評価指標の一つに位置づけることを目指している。

ところで、木材の気体透過性は、樹種の相違 (Siau, 1984 ; Côté, 1965), 早材と晩材の違い (Thomas, 1964 ; Comstock, 1965), 心材化に伴って生じる有縁壁孔の閉鎖 (Petty, 1970), 乾燥に伴って生じる有縁壁孔の閉鎖 (Fumoto et al, 1984) など、多数の因子に影響されるであろう。すなわち、透過性能は組織と構造に大きな影響を受けると言われており、木材の気体透過性と組織・構造とを明確に連携づけなければ、気体透過性による材質評価が達成できない。加えて、小試験片で求められる物理定数を実大木材の材質評価で機能させるには、物理定数である気体透過率が、樹幹内の部位と関係づけられ、さらに物質の通導・透過経路の顕微鏡観察の結果と密接に連携させて把握される必要がある。

この実験的基礎研究は、上の認識に基づき、生材から気乾材に至るまで自然乾燥されたスギ材とカラマツ材を使い、樹幹内部が異なるときの有縁壁孔を顕微鏡観察し、気体透過率との関連性を考察した。

2. 実 験

2.1. 供試木

試験木は、九州大学農学部北海道地方演習林産のカラマツ (35年生) を5本と、九州大学農学部粕屋地方演習林産のスギ (25年生) を4本 (クモトオシ2本, メアサ1本, ヤブクグリ1本) である。なお、カラマツ材の胸高直径は5本とも約30cm, スギ材の胸高直径は約25cmで、両樹種ともに成長は良好であった。

試験木は伐採のあと自然乾燥で気乾含水率に至っている。

2.2. 気体透過の実験

2.2.1. 試験片

気体の透過方向と小円柱状試験片の繊維方向とを一致させ、小円柱の半径を5mm, 長さを8mmとした。気体透過面となる横断面は、表面をマイクロームで削って仕上げ、シリカゲルが入ったデシケーターの中で乾燥・保存した。

なお、スギとカラマツの両樹種ともに、各試験木の胸高部位から円板を採取し、髄から放射方向に向かって、心材部, 移行材部, 辺材部から試験片を切り出した。

2.2.2. 気体透過実験装置への組み込み

試験片はガラス管に装着したあと、気体透過実験装置 (黒田ら, 1987) に組み込んだ。なお、試験片の側面, およびガラス管と試験片との接着面から空気が漏れないようにシリコンでシールした。そのあと、シリカゲルが入ったデシケーターの中で、気体透過実験に供されるまで乾燥・保存した。

ガラス管に装着して気体透過実験装置に組み込まれた試験片は、温度20°C, 相対湿度65%のもとで、定常状態における「みかけの気体透過率」が測定された。

みかけの気体透過率 k_g は、Darcy の法則に基づいて次式で算出した。

$$kg = \frac{Q \cdot L \cdot P}{S \cdot \Delta P \cdot P_x}$$

ここで, kg はみかけの気体透過率 [$\text{cm}^3/(\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{s})$], Q は流量 (cm^3/s), L は試験片の長さ (cm), S は試験片の横断面積 (cm^2), P は Q を測定した実験室の大気圧 (atm), ΔP は試験片両端間の圧力差 (atm), P_x は試験片内の平均圧力 (atm), すなわち, 試験片両端の圧力を P_1, P_2 とするとき, $(P_1+P_2)/2$ である.

また, みかけの気体透過率 kg は次式を使って換算され, 単位に darcy を使ったみかけの比透過率は Kg で表示した.

$$1 \text{ darcy} = 55.3 \text{ cm}^3(\text{air})/(\text{cm atm s}) \text{ at } 20^\circ\text{C}$$

木材中の気体の流れは粘性流と分子すべり流であり, 毛管のディメンジョンが気体分子の平均自由行程より小さいか等しいとき, 分子すべり流が生じる (Siau, 1984). したがって, Kg は平均圧 P_x によって変わる. この実験では, 試験片の下流側の空気圧 P_1 を調整し, 100~600mmHg の範囲を 5~6 段階の平均圧 P_x に変化させて, それぞれで Kg を求めた. そのあと, Adzumi 式 (Adzumi, 1937) から導き出された Klinkenberg 式 (Klinkenberg, 1941) を使って, 真の比透過率 K を求めた.

$$Kg = K(1+b/P_x) \dots \dots \dots \text{Klinkenberg 式}$$

ここで, b は分子すべり流ファクターである.

2.3. 晩材率の測定

晩材率は, 気体透過実験用試験片の透過面を CCD カメラで取り込んだあと, 得られた画像を出力し, 切り抜き法で求めた.

2.4. 有縁壁孔の閉鎖率の算出

気体透過実験に供した試験片の中から, 1 mm × 1 mm × 8 mm の試料を各試験片につき 2~3 個切り出し, 飽水状態にした. そのあとアセトンで脱水処理し, さらにアセトンをプロピレンオキサイドで置換し, エポキシ樹脂包埋した. なお, 包埋用エポキシ樹脂は Luft 法に基づいて混合した. このようにして得られた試料をウルトラマイクロームに装着し, ガラスナイフを使って 1~2 μm 厚の横断面切片を切り出した. そのあと, サフラニンで染色してプレパラートを作製し, 光学顕微鏡を用いて有縁壁孔の閉鎖状態を観察した.

各試験片から切り出された包埋試料ごとに閉鎖壁孔数と開放壁孔数を測定した. そのあと, 各試験片における有縁壁孔の閉鎖率が, 次式によって算出された.

$$\text{閉鎖率 (\%)} = \frac{A}{B} \times 100$$

ここで、Aは顕微鏡下で明らかに閉鎖が認められる有縁壁孔数の和を表し、Bは開放か閉鎖かが確認できた有縁壁孔数の和を示している。なお、1つの気体透過試験片ごとに閉鎖状態を観察できた有縁壁孔数は、60～100個程度である。また、早材と晩材の観察個数は晩材率と仮道管あたりの有縁壁孔数を十分に考慮して決定した。

3. 実験結果と考察

3.1. 気乾材の気体透過率

3.1.1. スギ材の真の透過率（K値）の変動

Fig. 1は、スギ3品種のすべての試験片について、髄からの相対距離と気体透過率との関係を示す。図から、一部の移行材部の試験片を除いて、気体透過率は、心材部から移行材部、さらには辺材部に向かって上昇する傾向が認められた。すなわち、K値は、心材部で $10^{-2} \sim 10^{-1}$ darcy, 移行材部で $10^{-2} \sim 10^0$ darcy, 辺材部で $10^{-1} \sim 10^0$ darcyの範囲にあり、K値は心材部におけるよりも辺材部で大きく、移行材部のK値は心材部と辺材部の中間的な値を示す傾向を認めた。しかし、一部の移行材部の試験片では、透過性が著しく悪く、移行材部から心材部、そして辺材部の順に透過率が上昇する傾向を示すものが認められた。また、移行材部の透過率には、心材部、辺材部におけるよりも大きなバラツキが認められた。

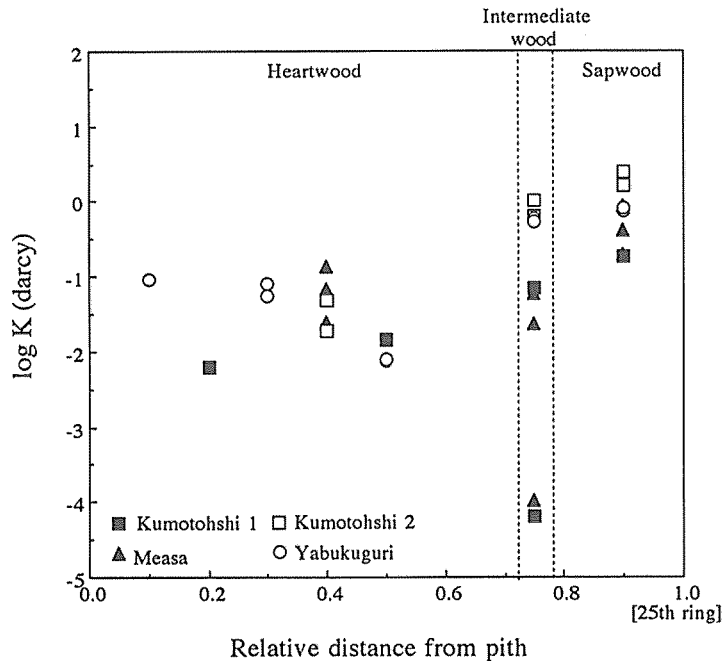


Fig. 1 Relationships between longitudinal air permeability and relative distance from pith of sugi (*Cryptomeria Japonica*) woods.

図1 スギ樹幹横断面内の気体透過率の推移

以上の結果から、一般に、スギ材のK値は、心材部におけるよりも辺材部で大きくなる傾向を示している。さらに、移行材の透過率Kは、ほとんどの場合に心材部と辺材部の中間的な値を示すが、一部の試験片では心材部よりも透過率が著しく低く、心材部と辺材部のどちらにも属さない独自の性質を持つことが認められた。

3.1.2. カラマツ材の真の透過率（K値）の変動

Fig. 2は、カラマツ材のすべての試験片について、髄から木部最外周部に向けた相対距離と気体透過率との関係を示している。カラマツ材においても、スギ材におけると同様に、心材部から移行材部へ、さらに辺材部に向けて気体透過率Kが上昇する傾向を認めた。すなわち、カラマツの透過率Kは、心材部で $10^{-4} \sim 10^{-1}$ darcy, 移行材部で $10^{-2} \sim 10^0$ darcy, 辺材部で $10^0 \sim 10^1$ darcyを示した。また、心材部のK値には大きなバラツキが認められた。なお、Fig. 1のスギ移行材部で認められた著しく低い透過性を示す現象は、カラマツの移行材部では認められなかった。

Fig. 1とFig. 2から、スギ材とカラマツ材の気体透過性を比較すると、心材部の気体透過率Kはスギ材よりもカラマツ材で低い傾向が認められた。一方、辺材部では、カラマツ材の方がスギ材よりも透過率Kが大きくなる傾向を認めた。また、移行材部では、カラマツ材よりもスギ材で大きなバラツキが認められた。すなわち、自然乾燥された木材の気体

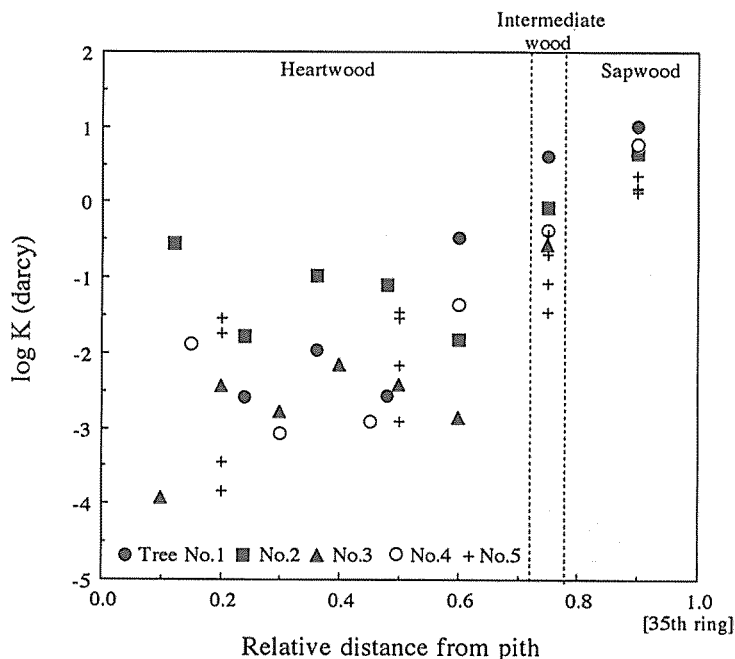


Fig. 2 Relationships between longitudinal air permeability and relative distance from pith of karamatsu (*Larix leptolepis*) woods.

図2 カラマツ樹幹横断面内の気体透過率の推移

透過率の樹幹横断面内推移には、樹種による相違が認められた。

3.2. 有縁壁孔の光学顕微鏡による観察

3.2.1. 樹幹横断面内における有縁壁孔の閉鎖状況

Fig. 3 はスギについて、Fig. 4 はカラマツについて、有縁壁孔の閉鎖率を髄から木部最外周部に向けた相対距離との関係で示している。2つの図が示すように、スギの閉鎖率は、品種の違いとはほぼ無関係に、心材部で65%~80%、移行材部で35%~75%、辺材部では25%~45%であった。他方、カラマツの閉鎖率は心材部で70%~90%、移行材部で65%~75%、辺材部では20%~35%であった。すなわち、スギとカラマツの両樹種ともに、心材部から移行材部、さらに辺材部へと閉鎖率の低下傾向が認められた。また、カラマツ材では、スギにおけるよりも心材部で大きい閉鎖率を得る傾向が認められた。移行材部では、辺材部におけるよりも心材部の閉鎖率に近い傾向を示すものが多かった。しかし、スギとカラマツの両者間で、閉鎖率の樹幹横断面内推移に顕著な相違が認められなかった。

3.2.2. 早材と晩材の有縁壁孔の閉鎖状況

Fig. 5 は、スギとカラマツの早材部における有縁壁孔を例示している。顕微鏡観察の結果によると、心材部では有縁壁孔の8割程度が閉鎖していた。なお、閉鎖した壁孔のほと

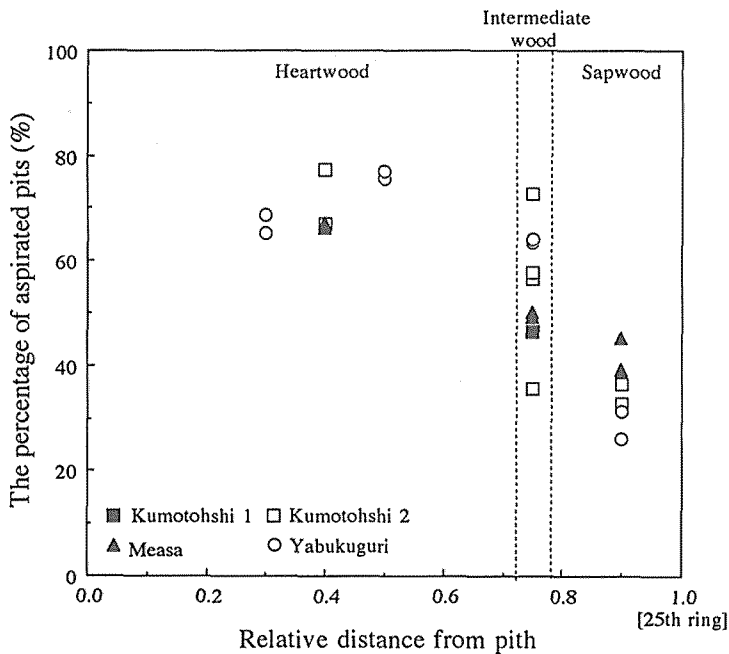


Fig. 3 Relationships between the percentage of aspirated pits of air-dried sugi (*Cryptomeria Japonica*) woods and relative distance from pith.

図3 スギ樹幹横断面内における有縁壁孔の閉鎖率

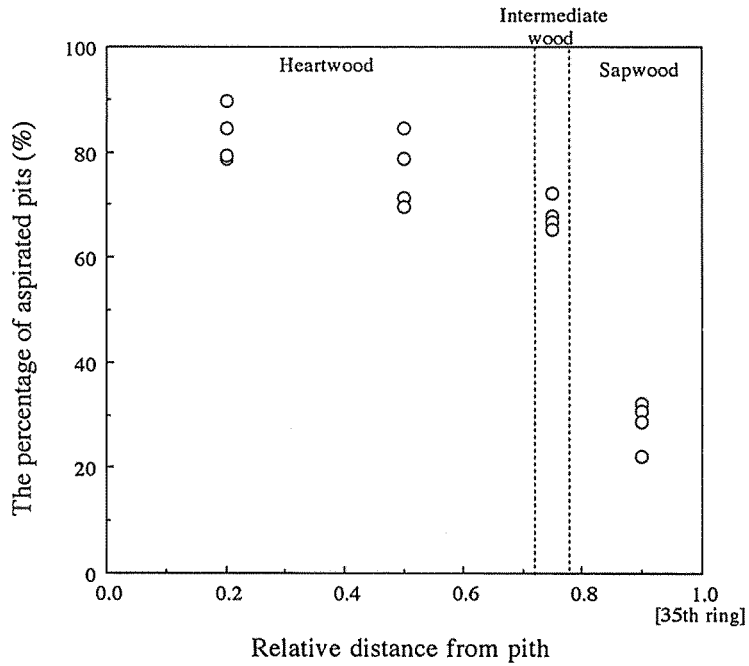


Fig. 4 Relationships between the percentage of aspirated pits of air-dried karamatsu (*Larix leptolepis*) woods [tree No.4] and relative distance from pith.

図4 カラマツ樹幹横断面内における有縁壁孔の閉鎖率

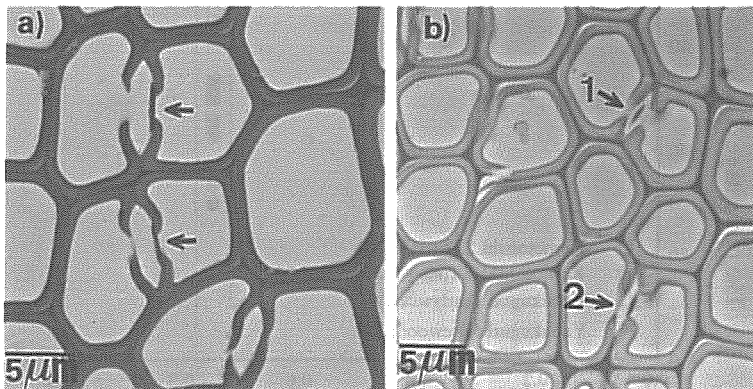


Fig. 5 Transverse section showing the variation of bordered pit in air-dried earlywood ; a) heartwood in karamatsu (*Larix leptolepis*) wood, b) sapwood in sugi (*Cryptomeria japonica*) wood.

図5 横断面で観察される有縁壁孔：a)カラマツ心材，b)スギ辺材

んどは早材部の有縁壁孔 (a) であり, 晩材部では閉鎖壁孔が多く見られるものの, 明らかに開放している有縁壁孔も観察された. 移行材部では, 閉鎖していない早材部の有縁壁孔が, 心材部におけるよりも多数観察された. 他方, 辺材部では, 早材部 (b) と晩材部の両者ともに, 開放している有縁壁孔が数多く観察された. また, 晩材部の有縁壁孔は明らかに開放しているが, 早材部では明らかに開放している有縁壁孔が少ない傾向を認めた.

Fig. 6 はスギについて, Fig. 7 はカラマツについて, 早材部と晩材部の有縁壁孔の閉鎖率を比較している. Fig. 6 のスギでは, 横断面内のすべての部位で早材部に比べて晩材部の有縁壁孔閉鎖率が低く, とくに心材部と移行材部の晩材では低い有縁壁孔の閉鎖率を示している. 他方, Fig. 7 のカラマツでは, 移行材部でスギと同様の傾向を認めたが, 心材部と辺材部では, 早材部と晩材部の壁孔閉鎖率に大きな差異を認めることができなかった. ところで, 自然乾燥されたスギ気乾材の心材部では, すでに述べたように, カラマツ材におけるよりも透過性がよく, 有縁壁孔の閉鎖率は低く, とりわけ晩材部の閉鎖率が低い. また, 自然乾燥によって早材仮道管のほとんどが閉鎖し, 晩材仮道管の32%が通導組織として機能することが報告されている (Petty, 1970). さらに, 自然乾燥されたカラマツ材について, 晩材率が大きい試験片にK値が高い傾向が報告されている (黒田ら, 1990). これらのことを考えあわせると, 自然乾燥材では, 気体透過経路としての晩材仮道管の役割を見逃すことはできないであろう. そこで, 試みの1つとして, 気体透過率と晩材率と

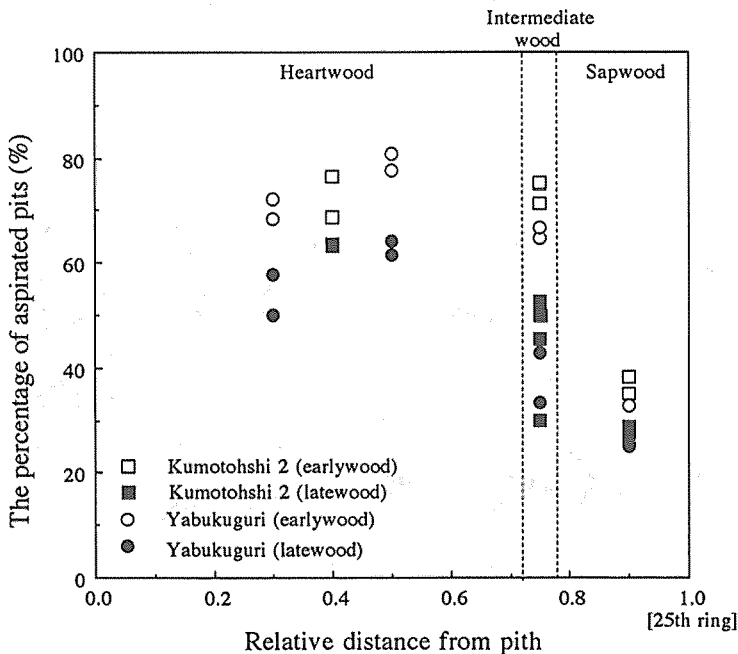


Fig. 6 Relationships between relative distance from pith and the percentage of aspirated pits of earlywood and latewood in sugi (*Cryptomeria japonica*) woods.

図6 スギ樹幹横断面内における早材部と晩材部の有縁壁孔閉鎖率

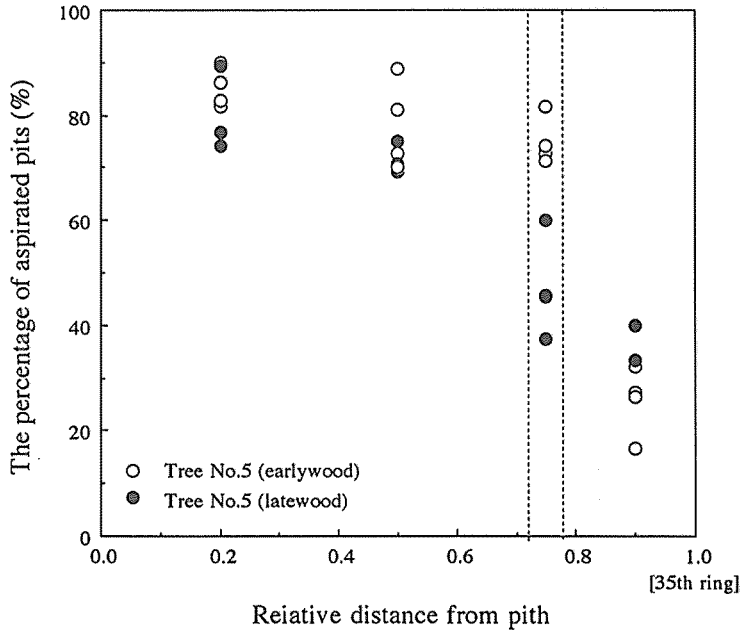


Fig. 7 Relationships between relative distance from pith and the percentage of aspirated pits of earlywood and latewood in karamatsu (*Larix leptolepis*) woods.

図7 カラマツ樹幹横断面内における早材部と晩材部の有縁壁孔閉鎖率

の関係をみたが、気体透過率への晩材率の顕著な関与を肯定するには至らなかった。ついでには、さらなる実験的データを積み重ね、心材、移行材、辺材の樹幹内部位ごとに、晩材率が気体透過性に及ぼす影響を考察しなければならないであろう。いずれにしても、カラマツ心材部よりもスギ心材部の晩材部壁孔閉鎖率が低いことが、両者のK値に相違が生じる要因の1つであろうと推測した。

3.3. 気体透過率と有縁壁孔閉鎖率との関係

Fig. 8 には自然乾燥されたカラマツ気乾材の有縁壁孔閉鎖率と気体透過率の対数との関係が示されている。すなわち、K値の対数と有縁壁孔の閉鎖率の間には、危険率が1%水準で負の相関が認められ、気体透過率への有縁壁孔の閉鎖率の関与が実験的に明らかになった。他方、スギ移行材部の気体透過率が心材部と辺材部で得られる値の中間的な値であるとき、カラマツにおけると同様に、有縁壁孔の閉鎖率と気体透過率との間に負の有意な相関が認められ、Fig. 9 に示されている。すなわち、心材化に伴って生じる有縁壁孔の閉鎖が、気体透過率に影響する主要な要因の1つであることが確認できた。なお、スギの移行材部では、Fig. 1 に見られるように、著しく低い気体透過率を示すことがある。しかし、スギ移行材部の壁孔閉鎖率は、クモトオシで49%、メアサで50%であり (Fig. 9 の丸で囲まれた部分)、心材と辺材で得られる値に対して中間的な数値を示している。すなわち、スギの移行材部で透過性が著しく悪いのは、閉鎖率以外の要因の関与が示唆された。

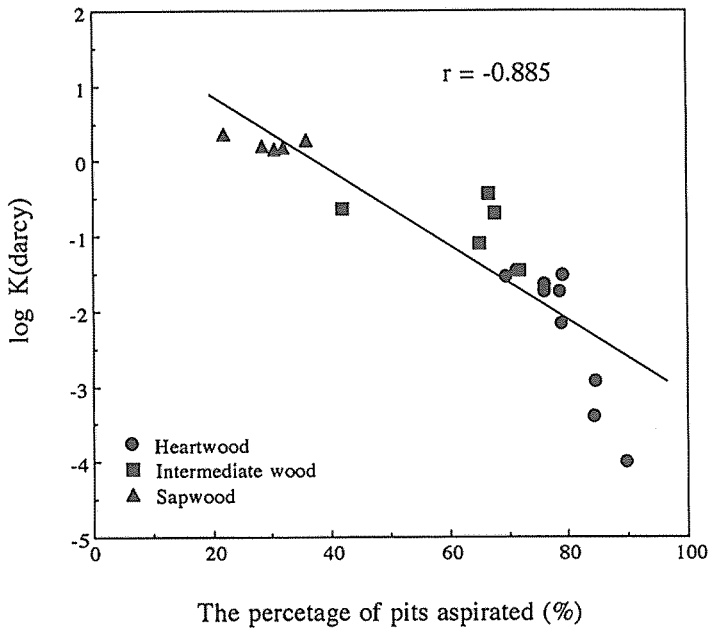


Fig. 8 Relationships between longitudinal air permeability and the percentage of aspirated pits of karamatsu (*Larix leptolepis*) woods.

図8 カラマツ材の気体透過率と有緑壁孔の閉鎖率との関係

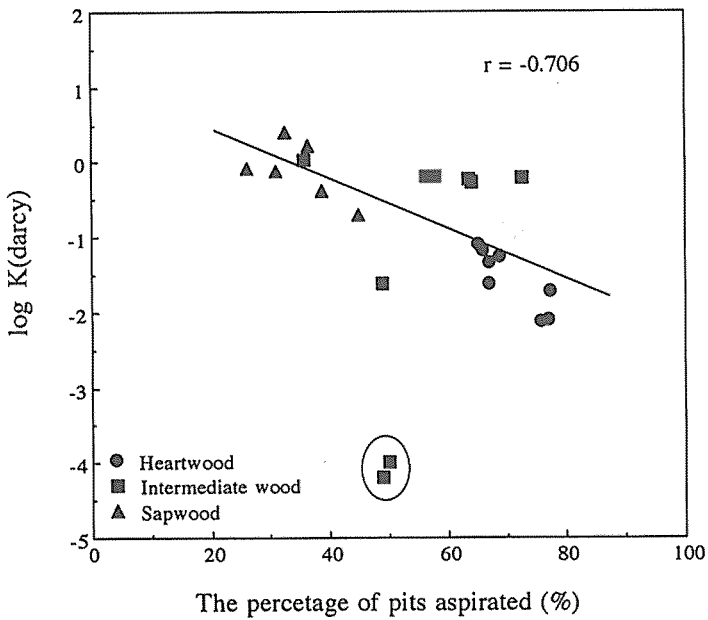


Fig. 9 Relationships between longitudinal air permeability and the percentage of pits aspirated of sugi (*Cryptomeria Japonica*) woods.

図9 スギ材の気体透過率と有緑壁孔の閉鎖率との関係

また、カラマツの移行材部では、有縁壁孔の閉鎖率が辺材部よりも心材部の閉鎖率に近い傾向を示したが、K値はむしろ辺材部に近い傾向を示している。さらに、カラマツ心材部におけるK値のバラツキもまた有縁壁孔の閉鎖率では説明できない。以上の結果から、自然乾燥されたスギとカラマツの樹幹横断面内の気体透過率は、有縁壁孔の閉鎖に大きく関与しているものの、壁孔閉鎖では説明できないことが多数ある。これらことについては、さらに実験的研究を積み重ねる必要があり、ここでは詳細な検討を行わない。

4. 結 論

- 1) スギ材とカラマツ材の両者で、心材部の気体透過率が低く、心材部から移行材部および辺材部に向かうに従って、透過率が上昇する傾向が認められた。しかし、スギの移行材部の一部には、気体透過性が著しく悪い部位の存在が認められた。
- 2) スギ材とカラマツ材の両者で、有縁壁孔の閉鎖率は、心材部から移行材部へ、さらに辺材部へと低下していく傾向が認められた。すなわち、有縁壁孔の閉鎖率の樹幹横断面内の推移には、樹種による相違は認められなかった。
- 3) 気体透過率と有縁壁孔の閉鎖率との間に有意な相関が認められることから、心材化に伴って生じる有縁壁孔の閉鎖が、気体透過性に大きく関与していることが明らかになった。しかし、スギの移行材部の一部やカラマツ心材部内でのバラツキなどは、有縁壁孔の閉鎖以外の要因が関与していると見られ、さらなる実験的研究が必要である。

引 用 文 献

- Adzumi, H (1937) : On the flow of gases through a porous wall. Bull. Chem. Soc. Japan 12 : 304-312
- Comstock, G. L (1965) : Longitudinal permeability of green Eastern Hemlock. For. Prod. J. 15 : 441-449
- Côté, W. A., Krahmer, R. L. (1962) : The permeability of coniferous pits demonstrated by electron microscopy. Tappi 45 (2) : 119-122
- Fumoto, H., Perng, W. R. and Sebastian, L. P (1984) : Studies on Flow in Wood VIII, Air permeability and polymer penetration of jack and red pines. Mokuzai Gakkaishi 30 : 646-652
- Klinkenberg, L. J (1941) : The permeability of porous media to liquids and gases. Drill. and Prod. Pract. : 200-212
- 黒田尚宏・堤 壽一・渡辺洋徳 (1988) : 広葉樹材の組織構造と空気透過性. 九大演報 58 : 123-136
- 黒田尚宏・堤 壽一・渡辺洋徳 (1990) : 水中貯蔵されたカラマツ材の空気透過性と組織・構造. 木材学会誌 36 : 602-608
- Petty, J. A., Puritch, G. S (1970) : The Effect of Drying on the Structure and Permeability of the Wood of *Abies grandis*. Wood Sci. Technol. 4 : 140-154
- Siau, J. F (1984) : Transport Processes in Wood. Springer-Verlag, Berlin, pp.73-104
- Thomas, R. J., Scheld, J. R (1964) : School of Forestry, N. C State College Tech. Rpt. No.19
- 堤 壽一 (1984) : 木材材質ということーその果たす役割りー. 木材工業 39 : 209-214
- 堤 壽一 (1986) : 木材材質とその意義ー林業と工業の接点を求めてー. 木材工業 41 : 460-465

(1994年4月12日受付; 1994年9月1日受理)

Summary

The permeability of wood was measured as the magnitude of the air-flow through wood. The bulk flow which includes the air-flow takes place in the pressure treatments of wood with liquid preservatives and the impregnation of wood chips with pulping chemicals.

The objectives were to establish the extent of any possible effect of pit aspiration and to determine the effect of aspirated pit to the permeability reduction. The effect of present investigation was therefore to determine the relationships between the air permeability and the fraction of unaspirated pits.

Sugi (*Cryptomeria japonica*) wood and karamatsu (*Larix leptolepis*) wood were selected for this study. The permeability and the fraction of aspirated pits were assessed for heartwood, intermediate wood, and sapwood.

The results were summarized as follows ;

1) In both wood species, sugi and karamatsu, longitudinal air permeability was quite low in heartwood and increased from intermediate wood towards sapwood (Fig. 1 and 2). However some intermediate wood specimens from sugi showed remarkably less permeable than the others (Fig. 1).

2) In both wood species, the percentage of aspirated pits declined with distance from heartwood towards intermediate wood and sapwood (Fig. 3 and Fig 4).

3) There was a significant correlation between the percentage of aspirated pits and longitudinal air permeability in air-dried sugi woods and karamatsu woods (Fig. 8 and Fig. 9). Therefore it was experimentally clarified that pit aspiration occurred during heartwood formation was related to longitudinal air permeability. As for less permeable specimens of sugi intermediate wood and the variation of K value in karamatsu heartwood, it may not be able to explain a reducing of longitudinal air permeability with only bordered pit aspiration.

Key words : gas permeability, pit aspiration, air-drying, heartwood, intermediate wood, sapwood, *Cryptomeria japonica*, *Larix leptolepis*.