針葉樹材中への水の自然縦浸透[†] ——軟X線デンスitomトリーによる解析

山元久美子* 大越 誠*
中戸莞二** 佐道 健**

Natural Penetration of Water into Softwoods ——Analysis by Soft X-Ray Densitometry

by

Kumiko YAMAMOTO, Makoto OHGOSHI, Kanji NAKATO and Takeshi SADOH
(Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kyoto)

Natural penetration of water into wood specimens was investigated by using soft X-ray densitometry. This method makes it possible to obtain the continuous moisture distribution within the specimen during water penetration without destruction.

Specimens were taken from the sap- and heartwood of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) and the sapwood of Akamatsu (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.), and trimmed to the dimension of 10 mm (R) × 10 mm (T) × 180 mm (L) and 10 mm (R) × 2 mm (T) × 180 mm (L). One end of each specimen was dipped in distilled water and the water uptake was measured continuously by a load cell. At given time intervals, the specimens were taken out to weigh water uptake and for soft X-ray irradiation. After these measurements, the specimens were put back to continue the water penetration. The X-ray film obtained was scanned both in L- and R-direction of the specimens by a densitometer. Moisture increase within the specimen was calculated from the difference of film densities before and after penetration. As a result, the changes in moisture distribution in L- and R-directions of the specimen and penetration height during the process were clarified. With the aim to make clear the path of water penetration, wood specimens were stained with 1% aqueous solution of acid fuchsin, and the split radial surface was observed under a stereoscopic microscope.

It was concluded that the moisture distribution in each direction of the specimen was characteristic of the wood species. This characteristic was considered to be caused by the difference in penetration mechanism due to wood structure.

(Received Dec. 7, 1982)

キー・ワード：針葉樹，自然浸透，軟X線デンスitomトリー

1 緒 言

木材中への液体浸透は，毛管内の表面張力現象として理論的に取扱われている¹⁾。木材内部の浸透経路等については，染料水溶液などを用いて浸透，着色させ，顕微鏡で観察されてきたが^{2)~5)}，この方法では，同一試験片で，浸透経過を定量的に知ることはできない。このように，木材内部の液体の分布状態を非破壊的に連続して，経時的に観察することが困難であるために，浸透機構の解明が十分になされていない。

本研究では，木材中の水の自然縦浸透に対して軟X線デンスitomトリーを適用し，浸透液体の分布状態，浸透先端の位置等の経時的な測定を行い，浸透経過を検討し，機構を考察した。

2 実 験

2.1 供試材および試験片

ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) 辺材 (気乾比重 0.38, 平均年輪幅 0.8 mm) および心材 (気乾比重 0.40, 平均年輪幅 1.22 mm) とアカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) 辺材 (気乾比重 0.42, 平均年輪幅 4.6 mm) を供試した。これらの供試材から，半径 (R) 方向約 10 mm × 接線 (T) 方向約 10 mm ×

[†] 原稿受理 昭和57年12月7日

* 京都大学農学部 京都市左京区北白川追分町

** 正 会 員 京都大学農学部 京都市左京区北白川追分町

繊維 (L) 方向 180 mm の棒状試験片を 3 個ずつ, またヒノキ辺材からは, さらに約 10 mm (R) × 約 2 mm (T) × 180 mm (L) の薄い板状試験片 3 個を, 連続した通路を得るために, いずれも木口面の鋸断以外は割裂によって作成した。これらの試験片は, 恒温恒湿器内 (20℃, RH 60%) で調湿後, 実験に供した。

2・2 浸透実験

浸透実験は, 上記の恒温恒湿器内で行った。実験に先だち, 各試験片のひょう量を直してんびんで行い, さらに Fig. 1 に示すように, フィルムケース上に試験片と後述の標準体を置き, 水平位で試験片の R 方向または T 方向に軟 X 線を照射し, 直下のフィルムに透過量を濃淡として造影させた。ついで Fig. 2 に示すように, 装置内のロードセルに試験片をつるし, その下端 2~3 mm を蒸留水中に浸せきし, 試験片の重量を動ひずみ測定器によって通算 24 時間レコーダーに記録, 測定した。すなわち, 浸せきしたのち所定時間 (20, 60, 240, 540, 1440 分) 経過後に, 装置から試験片を取り出し, 直してんびんで重量を測定した後, 引続き軟 X 線発生装置内へ移して照射し, これらの操作をすみやかに, 再び装置内へもどし浸せきを続けた。

2・3 軟 X 線デンストメトリーによる測定・解析

軟 X 線を用い, 次式によって, 川井ら⁶⁾は乾燥過程における水分分布測定を行っている。

1. Wood specimen 2. Reference 3. Scale
4. Soft X-ray film case
Arrows show the direction of soft X-ray beam.
(a) Side view, (b) Plane view, (c) Irradiation direction to annual rings.
R: Radial irradiation, T: Tangential irradiation

Fig. 1. Soft X-ray irradiation.

1. Wood specimen 2. Distilled water
3. Load cell 4. Acrylic resin plate
5. Strain meter 6. X-T recorder

Fig. 2. Penetration apparatus.

$$m_2 = \frac{m_2'}{d'''} \cdot (d' - d'') \quad (1)$$

本研究では, これを木材中への水の浸透過程に応用した。したがってここでは, m_2 は軟 X 線透過単位面積当りの浸透水分量, 銀粒子を上乘せしたポリエステルフィルムを数 10 枚階段状に積層したものを標準体としたとき, 軟 X 線の透過量について, m_2'/d''' は標準体 1 枚に相当する水の重量, d' は水浸透時の木材試験片に相当する標準体の枚数, d'' は気乾時の木材試験片に相当する標準体の枚数である。

軟 X 線照射には, 日本ソフテックス社製 CMO 型軟 X 線装置を, 造影フィルムには微粒子用富士ソフテックスフィルムを用いた。線源からフィルムまでの距離 73 cm, 電圧 40 kV, 電流 5 mA で, 試験片厚さ 2 mm では 8 秒間, 10 mm では 15 秒間照射した。

得られたフィルムについて, デンシトメータ (サクラミクロフォトメータ PDS-15) のスリット (幅 20 μ m, 高さ 700 μ m) を, 標準体と試験片の L または R 方向に一定速度 (1.0 mm/sec あるいは 0.1 mm/sec) で走査させ, 透過した光量を電圧に変換して増幅した後, これをデータレコーダにより磁気テープ上に記録させる。この磁気テープに記録された電圧を, パーソナルコンピュータ (ソード社 M 223 Mark III) によってデジタル変換し, 試験片のフィルム濃度を標準体枚数に換算して, 式(1)より, 試験片の L または R 方向の各位置における増加水分量を算出した。水分量は, 試験片の照射単位面積当りに含まれる水分量 M (g/cm²) で表した。これらの水分分布曲線において水分量が 0 となる L 方向の位置の下端からの距離を浸透高とした。

2・4 浸透経路の観察

浸透経路を明らかにするために, 染料水溶液を用いて, 2・2 節と同様の浸せき実験を行い, 数時間後取り出して, 半径面を割裂により出して, 実体顕微鏡により観察した。染料水溶液としては, 貴島・林らの用いた酸性フクシン 1% 水溶液を用いた。

3 結 果

3・1 浸透量の経時変化

Fig. 3 に下端を水中に浸せきした試験片の重量変化, すなわち自然縦浸透の経過曲線を示す。アカマツ辺材は, ヒノキ辺材と比較して, 常に浸透量が大きく, 試験片間の変動も大きい。ヒノキの辺材と心材を比較すると, ごく初期の浸透量では, ほとんど差がないが, 24 時間後には, 辺材は心材の約 1.6 倍に達する。

3・2 L 方向の水分分布の経時変化

R 方向照射試験片の側面から 5 mm の位置での L 方向における水分分布曲線を測定時間ごとに Fig. 4 に示す。ヒノキとアカマツでは, 明らかに異なるタイプの

Fig. 3. Water uptake by penetration into wood specimens. Legends correspond to those in Fig. 8.

Fig. 4. Changes in moisture distribution in longitudinal direction of wood specimens during water penetration. Radial irradiation. Insert figures show the changes at two different height.

曲線を示す。またアカマツ辺材では、各時間において、先端から 30~40 mm 付近の水分量にはほとんど差がなく、水中浸せき部の 20~30% に相当する。これに対してヒノキ辺心材では、浸せき下端よりある高さ (辺

材の 60 分で 15 mm, 1 440 分で 55 mm) から浸透先端より 10~20 mm 付近にわたって、水分量が高さにかかわらずほぼ一定値を示し、各時間においてこの一定値はほとんど変化せず、辺材で水中浸せき部の 2~6%, 心材で 2~4% である。ここで水中浸せき部の水分量は、両樹種とも空げき率から計算した飽水含水率にはほぼ等しい。

Fig. 4 の各図の右上に試験片の下端から 10 mm と 20 mm 高さにおける水分量の経時変化 (a, b) を示した。アカマツ辺材では、両高さにおいて、前述の水中浸せき部の 20~30% に相当する水分量を示す初期浸透の後、時間の経過に伴って水分量はほぼ直線的に増加するが、初期浸透後の浸透速度は比較的小さい。これに対してヒノキでは、辺心材とも初期浸透後の水分量が、10 mm 高さでは時間の経過に伴って曲線的に著しく増加し、20 mm 高さに比べて増加量も明らかに大きい。心材は、辺材と似た傾向を示すが、水分量が全体的に辺材よりも少ない。

Fig. 5 に、アカマツ辺材の同一試験片の早材部および晩材部における L 方向の水分分布曲線を示す。早材部と晩材部では、分布曲線のパターンが明らかに異なる。水中浸せき部分の水分量は、早材部がその大きい空げ

Fig. 5. Changes in moisture distribution in longitudinal direction of wood specimens during water penetration. Comparison between late- and earlywood of Akamatsu sapwood. Radial irradiation. Insert figures show the changes at two different height.

き率に基づき晩材部より大きい。直接浸せきされていない部分では、晩材部が圧倒的に大きい。しかも晩材部では、水分量は浸せき下端より 2~3 mm からほぼ一定値を示し、のち直線的に減少する傾向を示す。このある高さにわたっての一定の水分量は、水中浸せき部の約 50~60% であり、浸せき時間が長くなるにつれて増大し、その高さの範囲も長くなる。これに対して早材部では、一定値を示すことなく、下端より数 mm 付近からゆるやかに先端まで減少する。このような両部における水分分布曲線のパターンの相違を、同図に示した a, b で見ると、晩材部では浸透初期に水分量が著しく増加し、その後も直線的に増加するのに対し、早材部では浸透初期に顕著な水分増加が見られず、浸せき全期間にわたって曲線的に増加し、飽和値に達する傾向が見られる。

3・3 R 方向の水分分布の経時変化

Fig. 6, 7 は、アカマツ辺材およびヒノキ辺材のそれぞれについて、T 方向照射フィルムについて解析して得た試験片の下端より 20 mm, 70 mm 高さでの R 方向の浸せき前の密度と、浸せき後の水分分布の経時変化を示す。アカマツ辺材の分布曲線 (Fig. 6) を見ると、晩材部全域にわたって早材部よりも明らかに大きい浸透量を示し、両部で差が明確である。また一年輪中の早材部域で晩材へ近づくと水分量が増加する。

ヒノキ辺材 (Fig. 7) では、アカマツほど早材部と晩材部での浸透量の差が明確でない。下端より 20 mm 高さでの水分分布の経時変化をみると、全般的に

Fig. 6. Changes in moisture distribution during water penetration in radial direction of Akamatsu sapwood (10mm(R)×10mm(T)×180mm(L)) at two different height. Density is arbitrary unit. Tangential irradiation.

Fig. 7. Changes in moisture distribution during water penetration in radial direction of Hinoki sapwood (10mm(R)×2mm(T)×180mm(L)) at two different height. Density is arbitrary unit. Tangential irradiation.

は年輪界に近い晩材部でかなり大きい浸透量を示す(a)ものの早材部でも浸透量が晩材部に近いが、より多い部分(b)さえ認められる。また試験片側面で実質密度が低い(早材部)にもかかわらず浸透量の増大が見られる(c)のは、側面における拡張ぬれによるものと思われる。

3・4 浸透高さの経時変化

Fig. 8 に浸透高さの経時変化を示す。アカマツの浸透高さは、ヒノキに比べて大きい。ヒノキ辺材は浸透初期にかなり大きな値を示す。またヒノキの辺材と心材を比較すると、浸透量では時間の経過に伴い両者の差が広がる (Fig. 3) のに対して、浸透高さでは差

Fig. 8. Changes in penetration height of water into wood specimens. Legends correspond to those in Fig. 3.

が縮まる傾向を示している。24時間後で、辺材の浸透量は心材の1.6倍にあたるが、浸透高さではそれ程の差がない。

3・5 染料水溶液による浸透経路の観察結果

Fig. 9 に、アカマツ辺材、ヒノキ辺材および心材の染料水溶液浸せき数時間後に得た試験片割裂半径面の実体顕微鏡による写真を示す。写真はその下端が試験片の浸せき下端、右端が側面である。アカマツでは、晩材部全域の仮道管が帯状に染色しており、垂直樹脂道もかなり濃く染色している。また晩材部仮道管から放射組織への溶液の移動が非常に容易なようで、晩材部の染色先端部付近でさえ、放射組織を通ってのR方向の浸透が明らかに認められる。これに対して早材部仮道管では、染色は浸せき下端に限られ、ほかに放射組織から早材部仮道管の上下へのわずかな染色が見られるのみである。ヒノキ辺材では、年輪界に近い晩材部で顕著な率先的染色が見られ、他の部分もかなり染色している。また放射組織は下部に限って染色しており、染色された仮道管からR方向への移動が、アカマツに比べてきわめて少いことを示している。ヒノキ心材では、年輪界近くの晩材における率先的染色は、辺材とあまり変わらないが、他の部分の染色量は少い。

写真のヒノキ辺材、心材の試験片の側面がかなりの高さにわたって濃く染色しているのがわかる。染料水溶液に浸せき後数10分で、試験片側面を10 cm 付近

まで、溶液が速やかに上昇し、その後ほとんど上昇しなくなることが観察された。これは側面での拡張ぬれに基づくものと考えられ、試験片内部の水溶液の挙動とは明らかに異なる。

4 考 察

4・1 アカマツ辺材への水の自然縦浸透

Fig. 4 のアカマツの水分分布曲線で、各測定時間において、先端より30~40 mm の位置での水分量が水中浸せき部の20~30%に相当しほぼ一定であることから、浸透が一定の通路で率先的に進行していることが考えられる。この分布曲線は、また Fig. 5 からわかるように、何層かの早材部と晩材部の水分量の和と考えられる。両図を比較すると、浸透水分量の大部分は、晩材部のそれによって占められ、浸透の先端ほど晩材部の占める割合が大きい。両図のa, bから、アカマツ辺材の水中浸せき部の20~30%に相当する率先的な浸透水分量は、晩材部の水中浸せき部の50%に及ぶ初期浸透に起因しており、率先浸透は晩材部で起ることがわかる。さらに晩材部での浸透を詳しくみると、Fig. 5 の水分分布曲線で、晩材部では一定値を示す部分があり、時間の経過とともにこの部分が長くなることから、晩材部全域の仮道管で比較的早い時間で浸透が起り、水分量が一定値に達するものと考えられる。また先端部近くの直線的減少を示す部分がかなりの範囲の高さにわたってみられることを考えると、率先的な浸透が起る晩材内部でも浸透速度に差があることがわかる。これは、染料水溶液による観察結果とよく一致する。

上述のことは、Fig. 6 のR方向の水分分布でも明らかである。すなわち、早材部と晩材部の仮道管で同様に浸透が起れば、空げき率の大きい早材部での浸透量は、小さい晩材部より大きくなるはずである。結果はこれに反して、晩材部の水分量が早材部よりも明らかに大きく、時間の経過で両材部の差が小さくならないことは、浸透が晩材部仮道管で集中的に起っていることを示す。

L方向のある位置における率先浸透後の水分量増加の原因としては、遅れていた縦浸透、既浸透の仮道管から放射組織を通ってのR方向への浸透、細胞壁中への拡散などが考えられる。しかし、浸透経路の顕微鏡観察で、早材部では下端からの浸透がほとんど見られず、縦浸透は非常に少ないと考えられる。したがって、Fig. 5 に示す早材部での試験片の長い範囲の高さにわたる水分量の直線的な減少

Fig. 9. Radially split surfaces stained by the penetration of 1% aqueous solution of acid fuchsin for 3-4 hours.

や、高さ 10 mm および 20 mm での水分量が曲線的にゆるやかに増大することは、浸透した晩材部から放射組織を通じての水の移動とその広がりによるものと考えらるべきであろう。Fig. 6 で早材部での水分量が、晩材部へ近づくにつれ増加していることは、これを裏づけるものと思われる。

浸透経路の観察や、Fig. 6 の高さ 70 mm での60分の水分分布に示される早材部と晩材部の水分量の差が小さいことは、晩材仮道管から放射組織への移動が、かなり容易なことを示唆している。

4・2 ヒノキ材への水の自然縦浸透

ヒノキ辺材では、水分量が水中浸せき部の2～6%に相当する一定値を示す部分があり (Fig. 4), この部分で率先浸透が起っていると考えられる。2～6%の割合は、アカマツに比べて著しく小さい。Fig. 7 のR方向の水分分布から、また Fig. 9 の染料水溶液による染色の結果から、この率先浸透は年輪界に近い晩材部で起っていると考えられる。

浸透経路の観察からわかるように、アカマツとは異って、縦浸透が起った仮道管から放射組織を通過してのR方向の浸透は非常に少い。Fig. 4 の a, b を見ると、両者の形が異り、a は Fig. 5 のアカマツの早材部に、b は晩材部に近似している。また図には示さなかったが、浸透の先端部に近いほど、後者の形に似る傾向がある。しかし、ヒノキでは放射組織を通じてのR方向への浸透が少いことから、ヒノキの高さ 10 mm で、アカマツ早材部と経過曲線の形は似ていても、その内容は異なるものと思われる。すなわち、Fig. 7 の水分分

布曲線や Fig. 9 の染色において、年輪界に近い晩材部以外の仮道管への縦浸透が明らかに認められる。したがってヒノキのある高さでの率先浸透後の浸透量増加は、主として早材部仮道管への縦浸透によるものであり、この点でアカマツ早材部への浸透と異なる。

ヒノキ心材では、水分分布曲線やある高さでの水分量の経時変化 (Fig. 4), 染料水溶液による染色の結果 (Fig. 9) が、辺材とよく似た傾向を示すことから、両者への水の浸透機構に大きい差はないが、浸透量が全体的に心材では辺材に比べて小さい。

5 結 論

軟X線デンストメトリーの適用によって、木材中への水浸透の経時変化を定量的に知ることができた。

アカマツとヒノキでは、水分分布曲線や試験片のある高さにおける水分量の経時変化について、それぞれ特徴が認められ、その原因は、構造的な浸透機構の違いにあると考えられた。

(昭和56年4月1日 第31回日本木材学会大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) A. J. Stamm, For. Prod. J., **13**, 503 (1963).
- 2) 貴島恒夫, 林 昭三, 木材研究, No. 24, 33 (1960).
- 3) 貴島恒夫, 林 昭三, 木材研究, No. 36, 61 (1965).
- 4) 貴島恒夫, 林 昭三, 木材研究, No. 27, 22 (1962).
- 5) 矢田茂樹, 椋代純輔, 梶田 照, 京府大農演報, No. 26, 43 (1982).
- 6) 川井秀一, 中戸莞二, 佐道 健, 木材学会誌, **22**, 649 (1976).