

スギ生立木における樹液流の通導路

田中 徹¹⁾, 中井 毅尚²⁾

¹⁾島根大学大学院総合理工学研究科 材料プロセス工学専攻

²⁾島根大学総合理工学部 材料プロセス工学科

Conductive passive way of the sap flow in a *Cryptomeria Japonica* D. Don Standing Tree

Tooru TANAKA¹⁾ and Takahisa NAKAI²⁾

¹⁾ Master Course of Natural Resources Process Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Shimane University

²⁾ Department of Natural Resources Process Engineering, Faculty of Science and Engineering, Shimane University

Abstract

In order to investigate the conductive passive way of sap flow in the trunk of a *Cryptomeria Japonica* D. Don standing tree, the tree was cut down after the trunk was made to freeze directly by liquid nitrogen. In respect of the moisture profile of taken out freezing sample, moisture status was visualized by utilizing the soft X-ray and the Cryo-SEM. And, in addition to them, the conductive passive way of sap flow was observed by the safranin staining. Results obtained are summarized as follows:

1. The water existed in almost all the regions of sapwood in the trunk at the road clearance of about 1.2m. With approaching the white zone, the number of tracheid in which contains less water increased. In the white zone, the water hardly existed. Though the contents existed in almost all the tracheid of the heartwood, they were not only water but also heartwood materials. And more, in the region from the sapwood to the white zone, the water existed in almost all the latewood.

2. Almost the whole area of the sapwood at the position of 5mm higher than the position that injected the safranin (road clearance: 1.26m, $H_{1.26}$) was stained by safranin. And, in the white zone near the sapwood, it was recognized that only the latewood stained by safranin. In the sapwood at the position of 227mm higher than $H_{1.26}$, the earlywood was mainly stained by safranin. And, in the white zone near the sapwood, only the latewood stained by safranin as well as the previous position. And more, at the highest stained position, though the annual ring of current year was not stained by safranin, only the earlywood near the latewood in the annual ring of last year was stained by safranin. Finally, the heartwood at all measured positions was not stained by safranin.

Key words: conductive passive way, sap flow, soft X-ray, Cryo-SEM, safranin staining, sapwood, road clearance, white zone, heartwood, earlywood, latewood.

1. 緒言

樹木の通導組織は、仮道管、道管要素、および師部要素によって構成されている。樹木は、土壌の水分や養分を根の柔細胞を通して取り入れ、辺材部の通導組織を通して樹冠部の葉肉細胞へと輸送する。葉肉細胞で生成された光合成産物を、師部（内樹皮）を通じて樹木の各部位に分配し、樹木が成長するための原料、エネルギー源として使用する。水分移動に関しては、生きた細胞を通るのは根の柔細胞と葉の葉肉細胞のみである。水分のほとんどは、原形質が消失して通導機能を獲得した仮道管や道管を通過する。特殊な環境、例えば幹が凍結と融

解を繰り返す環境などを除いて、水分は根から葉まで切れることなく繋がっており、蒸散作用によって生じた強い吸水力が水分を連続的に引き上げているという水の凝集力説が最も有力である。一方、蒸散作用が停止すると、先の吸水力は低下していくとされている。

本研究室ではこれまでに、スギ生立木の樹液流量の連続測定を行ってきた。その結果、樹液流の累積量の1/3乗と樹幹直径との関係、すなわち樹木の肥大成長量と水分の移動量との関係が明らかになりつつある¹⁾。しかし、水分の通導部位、および通導状況は未だ解明されていない点が多々ある。

そこで本研究では、成長が活発な時期と休眠期に、ス

ギ生立木の樹幹を直接凍結させ、水分を固定した状態で伐倒し、樹幹横断面を軟X線、およびCryo-SEMで撮影し、これらの写真から年輪内、および年輪間における水分分布を明らかにした。また、スギ生立木にサフラニン染色液を注入して樹液の通導路を染色し、樹液流の通導部分の高さ方向および横断面方向での変化を調べた。

2. 実験

2.1 供試材料

島根大学構内の圃場スギ林に生育するオキノヤマスギを用いた。樹幹凍結による水分分布観察に供した生立木の本数は2本（以後、供試木A、および供試木Bとする）、また、染色による水分分布観察に供した本数は3本である。これらの平均樹高、および胸高部周囲長はそれぞれ約12m、および約46.1cmであった。地上高0.3m地点での平均年輪数は22、平均年輪幅は約3.2mmであり、また、胸高部の心材率、および晩材率はそれぞれ平均で約40.5%、および約6.4%であった。

2.2 実験方法

2.2.1 軟X線、およびCryo-SEMによる水分分布撮影

生立木2本の胸高部（地上高約1.2m）にプラスチック製のカラーを巻き、カラーの中に液体窒素を充填して樹幹を直接凍結させ（図.1）、樹幹内の水分を固定した。なお、この作業は樹液流量の少ない深夜に行った。今回の実験では、約30分間液体窒素をカラー内に流し込むことで樹幹の髄まで完全に凍結させることができた。樹幹を凍結させた後に、チェーンソーで生立木を伐倒し、凍結した胸高部から厚さ約2cmの円盤を採取した。採取した円盤から、鉋を使ってスリットを作製し、いったん液体窒素を満たした真空保冷容器中に保管した。その後、1～2年輪を含むブロック状の試験体（寸法： $L \times R \times T = 5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$ ）を作製した。作製した試験片の横断面、および接線面は、細胞内この観察を明瞭にするために、マイクロームやウルトラマイクロームで整えた。続いて、試験片を試料ホルダーに設置し、Cryo-SEMシステム（JSM840-a; JEOL Co.Ltd.）に移した。試料ホルダーは -110°C に保ち、真空維持（約 $1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ ）された凍結切断ユニットに固定した。試料を約5分間、霜を取り除くために凍結切断し、約 -160°C に保った走査電子顕微鏡に移した。電子映像は、3～5kVの電圧加速度で観察し、画像を写真撮影した²⁾。この顕微鏡写真を二値化画像処理し（図.2）、年輪間、および年輪内における水分量、および水分分布を明らかにした。

2.2.2 全乾法

供試木A、および供試木Bの胸高部から、円盤を採取して丸のこでスリットを作製した。作製したスリットを



図.1. 樹幹を凍結させるためのカラーへの液体窒素の充填風景。

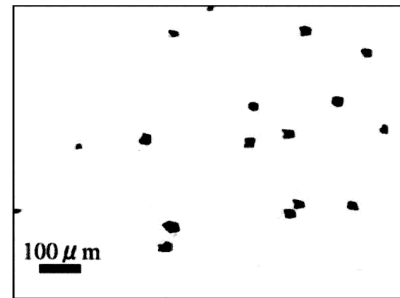
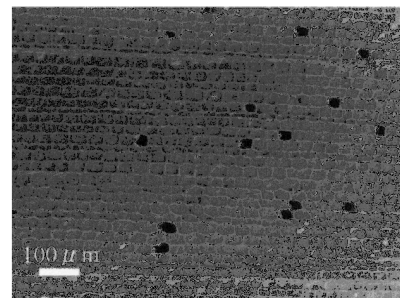


図.2. Cryo-SEM写真（上）と二値化処理後の写真（下）。
注釈：供試木Aの19年輪目。

髄で分割し、片方向を辺材、白線帯、および心材の各部位に丸のこで分割した。さらに、辺材から2つの試験体を作製した。なお、供試木Bに関しては心材を2分割した。ここで、髄側辺材試験体、および樹皮側辺材試験体をそれぞれS1、およびS2とした。また、白線帯試験体をW、心材試験体については辺材と同様に、髄側:H1、樹皮側:H2とした。作製した各試験体の生材重量 W_0 （含水率： U ）(g)を測定した後、 105°C のオーブンで24時間乾燥させて全乾重量 W_0 (g)を測定し、次式

$$U = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

より含水率 $U(\%)$ を求めた³⁾。

2.2.3 自由水充塞率

供試木 A, および供試木 B について, 前項で作製した試験体の全乾重量(g), および全乾寸法(cm)から全乾密度 $r_0(\text{g}/\text{cm}^3)$ を算出し, 以下の式

$$U_{\max} = U_{\text{fsp}} + \frac{1.50 - r_0}{1.50r_0} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

から飽水含水率 U_{\max} を求めた³⁾. 上式からえられた飽水含水率を用い, 以下の式

$$\text{自由水充塞率} = \frac{U - U_{\text{fsp}}}{U_{\max} - U_{\text{fsp}}} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

により自由水充塞率を定義した⁴⁾。

ここで, U : 含水率(%), U_{fsp} : 繊維飽和点における含水率=28(%), および U_{\max} : 飽水含水率(%). (3)式からえられた自由水充塞率は細胞間隙を含む細胞内こうに含まれる自由水の割合を表したものである. 例えば, 細胞間隙, および細胞内こう共に完全に水で満たされている場合の自由水充塞率は 100% であり, 逆に細胞間隙, および細胞内こう共に自由水が全くない場合の自由水充塞率は 0% となる.

2.2.4 画像解析

画像解析には, 汎用ソフト photoshop5.5(Adobe Systems Incorporated)と NIH Image1.62(Wayne Rasband)を用いた. Cryo-SEMで撮影した写真をグレースケール画像に変換すると, 細胞内こうに水分を含む部分はグレーに写り, 水分を含まない部分は黒に写る. これを明度など画像調整することで黒い部分を抽出するという二値化処理により, 水分を含む部分の割合を断面積比で算出した. また, この時, 細胞壁部分も黒く写るため, 細胞壁の影響を除外するため, 水分含量の低い白線帯部分の試験体をもとに細胞壁の割合を計算したところ, 断面積比で約 40%であった. この値を, 辺材, および心材の画像処理に適用した. また, 心材部分には心材物質が存在するため, 上記の細胞壁の場合と同様に, 二値化処理で心材物質の割合を算出し, 除外した.

2.2.5 樹液通導路の染色

スギ生立木樹幹の地上高 1.2m 地点に設置したプラスチック製のカラーにサフラニンを流し込み, 地上高 1.26m 地点 (以後, $H_{1.26}$ とする) において, 電動ドリルで樹幹の髄に達するまでせん孔し(図.3), 樹液の通導部分の染色を行った. なお, 染色に使用したサフラニンは, 1gのサフラニン粉を1kgの蒸留水で希釈した後, ろ過し

たものである. 樹液流量は, 午後 2 時頃にピーク値を示すことがこれまでの測定から確認されている⁵⁾. そこで, 午前 11 時半頃にサフラニンの注入を開始し, 午後 5 時頃に 2.2.1 で示した方法と同様な手法により樹幹を凍結させて樹幹内の水分を固定し, その後, 生立木を伐倒した. せん孔した部分から上方向に染色が認められなくなるまで, 連続して円盤を採取し, 各円盤の断面を観察した.



図.3. 樹幹内通導部分のサフラニン染色のためのドリルによるせん孔作業の様子.

3. 結果と考察

3.1 樹幹横断面の水分分布の観察

軟 X 線による観察の結果, 辺材 (図.4: 12 ~ 21 年輪) では早材, 晩材に関わらず, 全域で水分の存在が認められた. また, 白線帯 (図.4: 7 ~ 9 年輪) では, 晩材で水分の存在が認められたが, 早材では水分はほとんど確認できなかった.

一方, Cryo-SEM による観察の結果, 樹皮に近い辺材部位では, 軟 X 線による観察と同様に, ほぼ全域の仮道管内こうで水分の存在が認められた(図.5(a)). しかし,

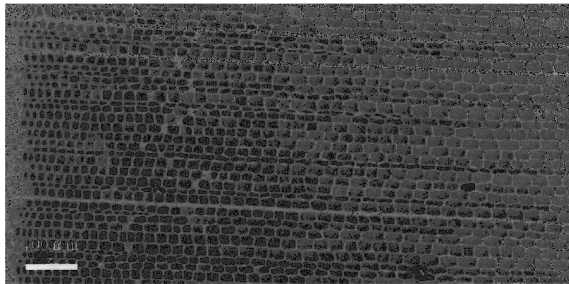


図.4. 供試木 A の軟 X 線写真.
注釈: 写真中の数字は年輪番号を表す, 21: 当年輪.

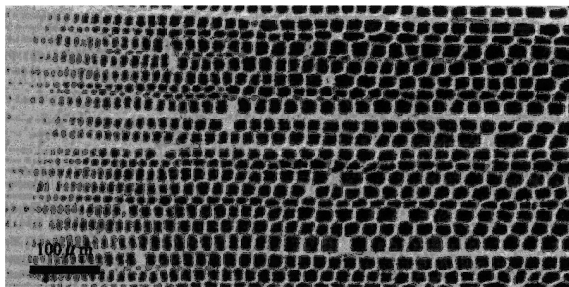
髓方向に向かうにつれて、辺材の仮道管内こうに水分を含まない仮道管が増える傾向にあり、白線帯との境界部では、水分を全く含まない仮道管が面積比でほぼ半分に達した。白線帯では、晩材の仮道管内こうの一部に水分が存在していたが、早材では水分の存在は確認できなかった(図.5(b)). 心材ではほぼ全ての仮道管内こうに水分が充填されていたが、水分と共に心材物質と思われるものの中には確認できた(図.5(c)). ただし、心材に関しては、試験片作製の都合上、白線帯に接する1年輪のみ観察した。

3.2 全乾法による樹幹横断面の含水率分布

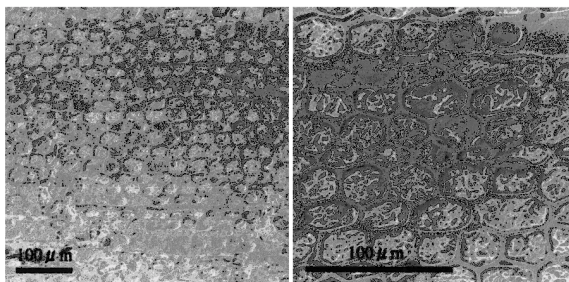
供試木 A, および B の含水率を全乾法で測定した結果、図.6から明らかなように、樹皮側の辺材試験体 S2 が最も高い含水率を示し、白線帯に近い辺材試験体 S1 は S2 より平均で 75% 程度含水率が低かった。また、全部位のうち、白線帯試験体 W の含水率が低く、また、心材試



(a) 辺材部分, 21 年輪目.



(b) 白線帯部分, 9 年輪目.



(c) 心材部分, 6 年輪目, 右図は左図の拡大図である.

図.5. 供試木 A の Cryo-SEM 写真.

験体 H 部分の含水率は、約 150% と比較的高い値を示した。これら含水率の増減の結果は前項で述べた Cryo-SEM 写真の結果と同様の傾向であった。

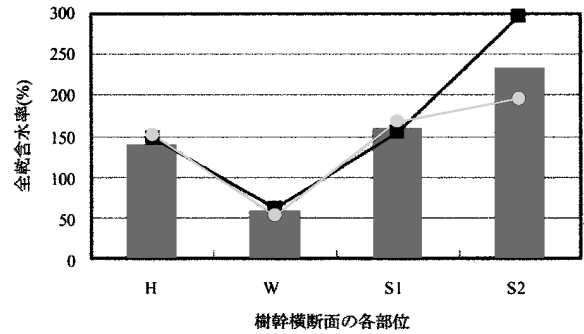


図.6. 全乾法により求めた辺材, 白線帯, および心材の含水率.

凡例: ○; 供試木 A, ■; 供試木 B, ■; 平均, S1; 髓側の辺材, S2; 樹皮側の辺材, W; 白線帯, H; 心材.

3.3 画像解析 (二値化処理) および推測式による樹幹横断面の水分分布

供試木 A, および B の樹幹横断面における各部位の自由水の状態を, (3)式で定義した自由水充塞率の関係式から推測した. 図.7から明らかなように、樹皮側の辺材試験体 S2 の自由水充塞率が最も高く、平均で 94.4% であった。すなわち細胞間隙を含む細胞内こう中の大部分が自由水で満たされていた、ということが分かった。一方、髓側の辺材試験体 S1 の自由水充塞率は、平均で約 77.1% であった。また、白線帯試験体の自由水充塞率は全部位の中で最も低く、約 16.4% (平均値) であった。

ここで、Cryo-SEM 写真を二値化処理して求めた自由水の存在比 (面積比) と, (3)式より求めた自由水充塞率とを比較した。図.8から明らかなように、両者の間には直線関係: $y=1.0725x$ が認められた。回帰直線から明らかなように、Cryo-SEM 写真から求めた値の方が高くなる傾向が認められたが、この原因としては、Cryo-SEM 写真を二値化処理する際に、画像解析の精度上、全ての細胞間隙は自由水で満たされている、と判別したためであると思われる。なお、二値化処理の画像解析精度に加え、切断面表面に付着した埃の影響、あるいは切断時に仮道管断面がつぶれた影響なども、直接計算値に多大な影響を及ぼすため、試料作製には細心の注意を払う必要があると思われる。

3.4 サフラニン染色による水分通導部分の観察

サフラニン染色には供試木を 3 本用いたが、活動期および休眠期に同様な傾向が認められたため、代表的な休眠期の供試木 1 本についての結果を以下に説明する。サ

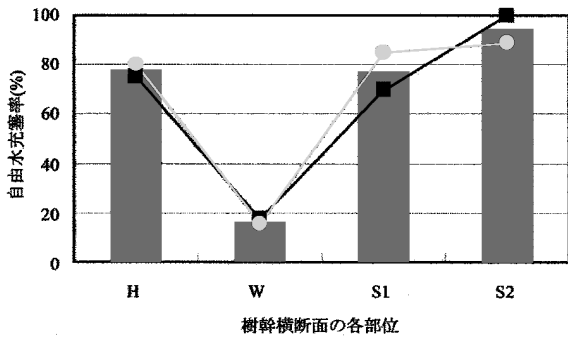


図.7. 推測式から求めた自由水充塞率.
 凡例: ●; 供試木 A, ■; 供試木 B, ■; 平均, S1; 髄側の辺材, S2; 樹皮側の辺材, W; 白線帯, H; 心材.

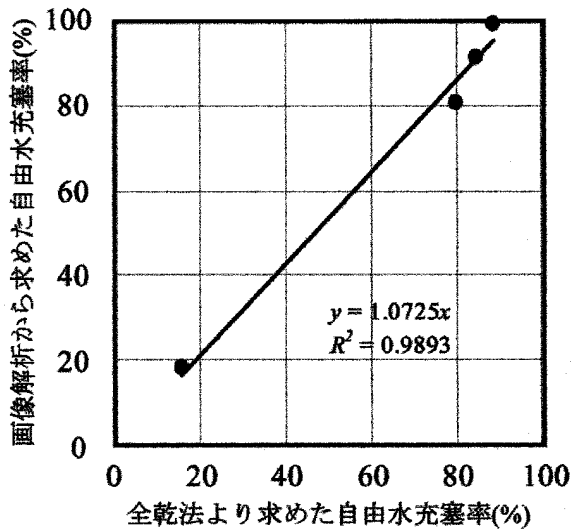


図.8. 全乾法および画像解析 (二値化処理) から求めたそれぞれの自由水充塞率の対応関係.
 注釈: 供試木 A.

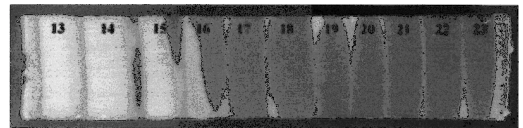
フラニン染色の結果, 染色液を注入した $H_{1.26}$ から 5mm 上の地上高部位では, 辺材部のほぼ全域で染色が認められた (16~23 年輪). また, 白線帯では, 辺材に近い部位で晩材の染色が認められた (図.9(a) 矢印). $H_{1.26}$ から約 227mm 上の辺材では主に早材部分の染色が認められた (17~23 年輪). 逆に辺材に近い白線帯では, 晩材部分の染色が認められた (14 年輪) (図.9(b)). さらにサフラニンが到達した最上部位から採取した試験体を観察すると, 樹液が最も早く上昇する部位は当年輪ではなく, その一つ内側の年輪の早材であることが明らかとなった (図.9(c)). これらの様子を 1~2 年輪ずつ取り出し図示すると図.10~図.12 の通りである.

また, 実際に樹液が流れている部位を, 樹幹横断面を真円と仮定して面積比を求めたところ, 樹液が流れてい

る部分は, 樹幹横断面全体の約 70% を占めていることが分かった. なお, 今回用いた供試木では, 染色が認められた部位の高さ方向の距離は 2.14m であり, この高さを本実験では約 5 時間 40 分かけて染料が上昇したことから, 樹液流速度は約 0.38m/時であった.



(a) $H_{1.26}+5\text{mm}$.



(b) $H_{1.26}+227\text{mm}$.



(c) $H_{1.26}+444\text{mm}$.

図.9. 樹幹横断面の半径方向における地上高別のサフラニンによる染色の様子.

4. 結論

スギ生立木における樹幹横断面の水分分布を, 軟 X 線, および Cryo-SEM を用いて視覚化した. また, 細胞内こう中に含まれる自由水の割合を自由水充塞率として算出した. その結果, 白線帯に近い辺材では水分を含まない仮道管もあったが, 樹皮側の辺材では, ほぼ全域が水分で満たされていた. また, 白線帯の早材部は内こうにほとんど水分を含んでいなかったが, 晩材では仮道管内こうに一部水分が確認できた. また, 含水率と全乾密度から算出した自由水充塞率の結果は, これらと同様の結果であった.

スギ生立木の地上高 1.26m ($=H_{1.26}$) 地点の樹幹を電動ドリルでせん孔し, サフラニン染色液を樹幹内に注入し, 樹幹横断面における水分通導部分を観察した. その結果, 辺材では染色液を注入した地点から 5mm 上では辺材の全域が染色されていたが, 227mm 上部では晩材の染色が確認できなくなった. また, 辺材に近い白線帯では晩材の染色が認められた. さらに上部の $H_{1.26}+444\text{mm}$ 地点の辺材では, 晩材に移行する直前の早材のみ染色が認められた. なお, 心材部分の染色はいずれの地上高でも認められなかった.

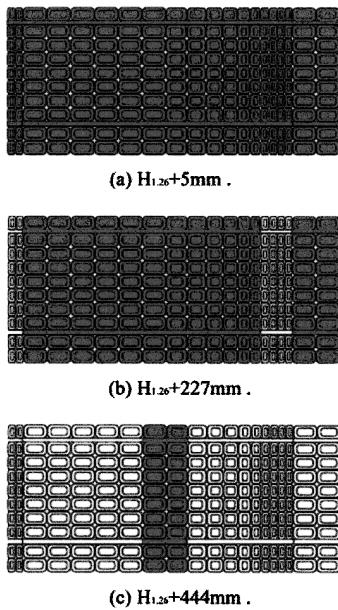


図.10. 辺材部における地上高別の水分通導状況.

注釈: 地上高 1.26m(= $H_{1.26}$)の部分に髓までドリルで穴を開け, サフラニンを流し込んだ. (a):辺材部分は早, 晩材共に染色されていた, (b):晩材に染色が認められなくなった, (c):(b)以降, 後期に形成された早材部分に染色が収束していった.

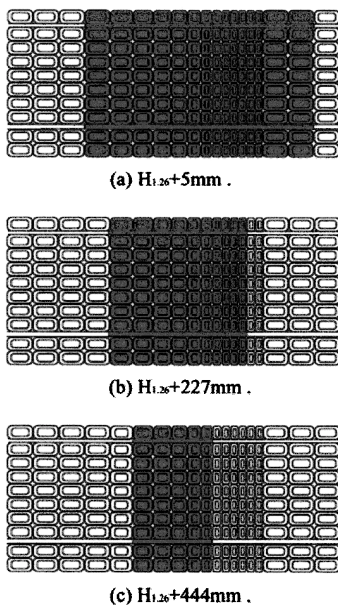


図.11. 白線部における地上高別の水分通導状況.

注釈: 地上高 1.26m(= $H_{1.26}$)の部分に髓までドリルで穴を開け, サフラニンを流し込んだ. (a):晩材とその周辺の早材の一部に染色が確認できた, (b):次年輪に接した晩材, 次年輪の早材および晩材と同年輪の早材の一部から染色が認められなくなった, (c):(b)以降, 後期に形成された早材部分に染色が収束していった.

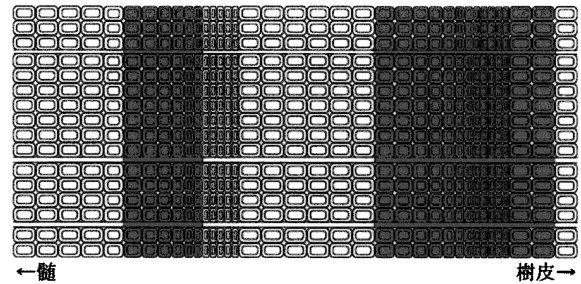


図.12. 白線部における横断面方向の水分通導状況.

注釈: 地上高 1.26m(= $H_{1.26}$)の部分に髓までドリルで穴を開け, サフラニンを流し込んだ. $H_{1.26}+5\text{mm}$ の部分を示す. 樹皮側では, 晩材部分とそれに隣接した当年輪, および次年輪の早材部分に染色が確認できた. 髓側では, 同一年輪内において, 後期に形成された早材部分と初期に形成された晩材部分に染色が認められた.

参考文献

- 1) 中井毅尚, 中尾哲也, 安部久: スギ生流木の成長量と樹液流量との関係, 第51回日本木材学会大会研究発表要旨集, 東京, p.36(2000).
- 2) Yasuhiro Utsumi, Yuzou Sano, Jun Ohtani, Seizo Fujikawa: Seasonal changes in the distribution of water in the outer growth rings of *fraxinus mandshurica* var. *japonica*: A study by cryo-scanning electron microscopy: *IAWA journal*, 17 (2), p.115, 1996.
- 3) 中山義男, 高橋徹: “木材科学講座3 物理”, 海青社, p.32-33, 1992.
- 4) 釜口明子: 横打撃共振法による生立木の心材含水率測定および非破壊調査, 鳥取大学大学院連合農学研究科 学位論文(2001年度), p.59.
- 5) 福島和彦: 平成13年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(1)) 研究成果報告書(課題番号13896003), 2002, p6-9.

謝辞

Cryo-SEM 観察および写真撮影は, 北海道大学農学部で, 九州大学大学院農学研究科, 内海泰弘博士のご協力により行われた. また, 含水率の生データの一部を, 釜口明子博士にご提供いただいた. ここに記して, 厚くお礼申し上げます.