

スギ生立木における樹液流の通導路Ⅱ

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 sap flow in *Cryptomeria Japonica* D. Don Standing Trees II

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

The conductive passive way of sap flow in the trunk of a *Cryptomeria Japonica* D. Don standing tree was observed by the safranin dyeing. As a result, almost the whole area of the sapwood at the position of 1.5cm higher than the position that injected the safranin (road clearance: 1.7m, H_{1.7}) was stained by safranin. In the white zone near the sapwood, it was recognized that only the latewood stained by safranin. And, in the white zone near the sapwood, only the latewood stained by safranin at the position of 7.4cm higher than H_{1.7}. And more, the safranin dyeing was not accepted absolutely in the white zone at the position of 19.5cm higher than H_{1.7}. As estimated from above results, it was thought that the safranin dyeing in the white zone occurred by originating from the capillary attraction, and it was not a result of the conductive passive of sap flow. Finally, the heartwood at all measuring positions was not stained by safranin.

Keywords: conductive passive way, safranin dyeing, sapwood, white zone, capillary attraction, heartwood

1. 緒 言

樹木内の一部の水は、生きた細胞、すなわち根の柔細胞と葉の葉肉細胞を通過するが、大部分の水は、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。また、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は、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（水の凝集力説）。水分の上昇パターンとしては、裸子植物を用いた実験で主に5パターンに分類できると報告されている¹⁾。すなわち、(A) 右回りのらせん上昇型 (spiral ascent turning right), (B) 左回りのらせん上昇型 (spiral ascent turning left), (C) 連結上昇型 (interlocked ascent), (D) 部分らせん上昇型 (sectional winding ascent), (E) 部分垂直上昇型 (sectional straight ascent), である。本年度および昨年度実験に供したスギの場合は、上記のうち右回りのらせん上昇型にあたる。前報²⁾では、この上昇する水分の通導経路を、サフラニン染色によって視覚化して詳しく調べた。その結果、辺材部位では、全般にわたって水分通導が確認できたが、上昇速度に

は部位による差が認められた。すなわち、樹皮側数年輪がほぼ同じ速度で早く、その内側の部位では、白線帯に最も近い年輪を除いてほぼ同じ速度で先に比べ遅かった。また白線帯に最も近い年輪では、前者と後者の領域のほぼ中間的な上昇速度であった。樹皮側数年輪をさらに詳細に調べたところ、最も早い上昇速度の年輪は、当年輪とは限らなかった。一方、心材部位では、染色は全く認められず、水分通導は起こっていなかった。さらに白線帯部位では、若干染色が認められたが、これが蒸散に伴う水分通導によるものであるのか、あるいは毛管張力によるものであるのかをはっきりさせることは出来なかった。

そこで本研究では、昨年に引き続き、スギ生立木のサフラニン染色を行い、特に白線帯部位の挙動を詳しく調べた。

2. 実 験

2.1 供試材料

島根大学三瓶演習林のスギ林に生育する20年生のスギ1本を用いた。樹高は約13m、胸高部周囲長は77cm、平

均年輪幅は約5.1mm, 心材率は約58%であった. 前報²⁾で用いた供試木は, 島根大学構内の圃場スギ林に生育する平均22年生のオキノヤマスギで, 樹高, 胸高部周囲長, 平均年輪幅, および心材率はそれぞれ約12m, 46.1cm, 約3.2mm, および約40.5%であった. 生育環境などの差によるものと考えられるが, 樹齢および樹高は両者ともほぼ同等であったが, 今回用いた供試木の方が胸高部周囲長で約30cm, 平均年輪幅も2mm程度大きかった. また, 心材率も今回用いた供試木の方が大きく, 心材直径に換算すると約8cm大きかった.

2.2 実験方法

2.2.1 全乾法

供試木を伐倒後, 地上高106cmから280cmの部分を, チェーンソーを用いて, 平均厚さ約4cmの円盤に玉切りした. 玉切りした円盤を, 丸のこで太鼓挽きし, さらに鉋で辺材, 白線帯, および心材の各部位に3分割した. その後, 辺材(および心材)をさらに2分割し, 髓側辺材(心材)試験体, および樹皮側辺材(心材)試験体をそれぞれS1(H1), およびS2(H2)とした. また, 白線帯はWとした. 前報²⁾と同様, 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℃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

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

より含水率 $U(\%)$ を求めた³⁾.

2.2.2 自由水充塞率

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 $r_0(g/cm^3)$ を算出し, 以下の式

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

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

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

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



Fig.1. The situation that injected the safranin dye into the tree trunk.

Note: A collar composed of a plastic funnel was fitted around the stem at the height of road clearance 160cm, and the collar was filled with safranin dye. And after, the electromotive drill was inserted in the color satisfied by the safranin dye, and the hole 5mm in diameter was made at the height of road clearance 170cm with the drill to inject the safranin dye into the trunk. The reason, which the drilling into the trunk was operated in the safranin, was for preventing the inflow of the air to the trunk inside.

は0%となる.

2.2.3 樹液通導路の染色

スギ生立木樹幹の地上高1.6m地点に設置したプラスチック製のカラーにサフランinを流し込み, 地上高1.7m地点(以後, $H_{1.7}$ とする)において, サフランin液中に電動ドリルを入れて, 樹幹の髓に達するまでせん孔し, 樹液の通導部分の染色を行った. 今回の実験では, 一つ目に開けた穴と反対側にもう一箇所同様な深さまでせん孔し, 合計2箇所サフランinを流し込んだ(なお, 今回の実験では2箇所ともほぼ類似した染色結果がえられた). この場合, 染色に使用したサフランinは, 1gのサフランin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⁾ため, それ以前の午後0時頃にサフランinの注入を開始した. なお前報²⁾の実験では, 5時間半程度の短時間の染色であったが, 今回の実験では, 水分通導部位の染色をより明確にするため, 昨年よりも約2日長くサフランin染色を行った. 注入開始3日後の午前11時に

生立木をチェーンソーにて伐倒した。せん孔した部分から上下方向に染色が認められなくなるまで、連続してチェーンソーで円盤を採取し、各円盤の横断面を観察した。なお、昨年度の実験において、サフラニン染色を成長期と休眠期にそれぞれ行ったところ、横断面の染色の様子はほぼ同様な傾向が認められたため、今回は休眠期にのみ実験を行った。

3. 結果と考察

まず初めに今回の供試木横断面における水分の分布状況を詳しく説明し、その後、水分通導経路について詳しく紹介する。

3.1 全幹法による含水率分布

半径方向の水分の分布状況を Fig.2 に例示した（平均値）。その結果、辺材試験体 S1, S2 は共に 200% を超える高い含水率を示し、白線帯試験体 W では、辺材部位に比べ 75% とかなり低い値となった。また、樹皮側心材試験体 H2 は 150% 程度と比較的高い値を示したが髓側心材試験体 H1 では 60% 程度とかなり低い値となった。半径方向の分布を大別すると 4 タイプ（タイプ A～タイプ D）に分類されることが報告されている⁶⁾。いずれのタイプも辺材含水率は高く、白線帯で急激に含水率が減少することは共通しているが、心材含水率に大きな差が認められる。すなわち、タイプ A：白線帯と同等な低い含水率、タイプ B：髓方向に向かって徐々に含水率が上昇、タイプ C：心材全般にわたって辺材と同等な高い含水率、タイプ D：白線帯側で含水率が高く（辺材ほどではない）、髓方向に向かって徐々に含水率が減少していく、である。この分類方法に当てはめると、今回の供試木はタイプ D に当たる。なお、昨年度も今年度同様、タイプ D であった。

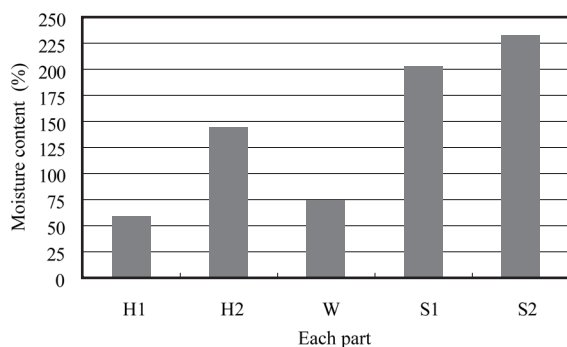


Fig.2. Example of changes of the moisture content in the cross section of trunk at average of the height of road clearance from 106cm to 280cm.

Legend: H1 and H2; Heartwood by the sides of pith and bark, respectively, W; White zone, S1 and S2; Sapwood by the sides of pith and bark, respectively.

3.2 推測式による自由水充塞率

樹幹横断面における自由水の状態を、(3)式で定義した自由水充塞率の関係式から推測し、部位別にプロットした (Fig.3)。その結果、まず辺材部は、90%前後の高い数値を示しており、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推測できた。昨年度の推測計算では、髓側辺材試験体が約77%と今回より若干低い値となっていた。続いて、白線帯部においては、約20%と昨年度同様低い値を示した。なお、白線帯部の Cryo-SEM や軟 X線観察の結果から、この部位では晩材部と早材部との境界部付近にしか水分が確認できなかった²⁷⁾。最後に、心材部においては樹皮側心材試験体 H2 が約 50%、髓側心材試験体 H1 が約 20% であり、昨年度より若干低めではあったが、傾向はほぼ一致していた。

3.3 サフラニン染色による水分通導部分の観察

まず初めに辺材部のサフラニン染色の様子を以下に紹介する。H_{1,2} から数センチ上の部位までは、前報²⁾同様、辺材部のほぼ全域（年輪番号：14～20）でサフラニン染色が認められた (Fig.4(a))。続いて、樹高方向にサフラニン染色の様子を観察していくと、辺材部の一年輪内では、まず晩材部分からサフラニン染色が確認できなくなり、それに加えて早材部分のサフラニン染色も確認できなくなり、最終的には晩材部分と早材部分の境界のみがサフラニン染色されていた（今回の実験でサフラニン染色が確認できた最上部：Fig.4(d)）。一年輪内におけるこれらの挙動は昨年度とほぼ同様であった。また、最も樹液流の速度が速かった部位は、昨年度：すべて前年輪、今年度：当年輪と前々年輪、であり、これらの結果をまとめると、樹液流が流れる最速部位は、当年輪から内側数年輪内であることが明ら

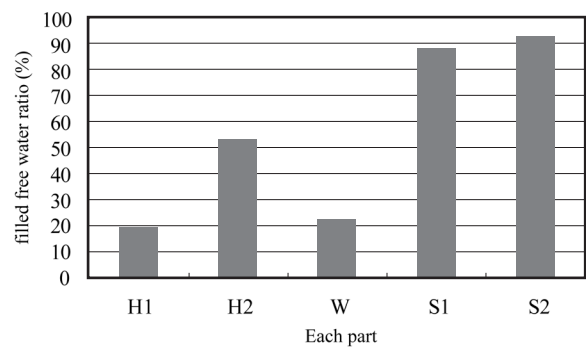


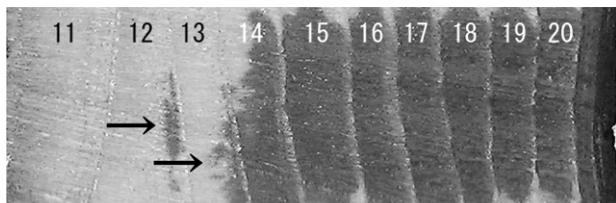
Fig.3. Example of changes of the filled free water ratio by using kiln-drying method in the cross section of trunk at average of the height of road clearance from 106cm to 280cm.

Legend: H1 and H2; Heartwood by the sides of pith and bark, respectively, W; White zone, S1 and S2; Sapwood by the sides of pith and bark, respectively.

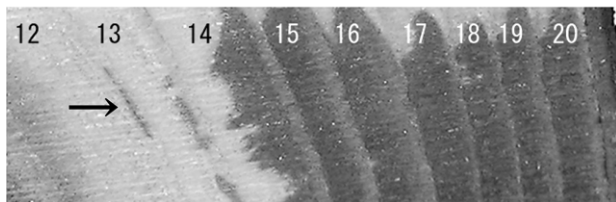
かとなった。

次に、白線帯部のサフランニン染色の様子を以下で紹介する。今回の供試木では白線帯部は2年輪のみであった (Fig.4, 年輪番号: 12 および 13)。サフランニン染色は、晩材部分から、顕著なものでは晩材部分と早材部分の境界付近まで認められた (Fig.4(a)矢印)。続いて、樹高方向にサフランニン染色の様子を観察していくと、 $H_{1.7} + 7.4\text{cm}$ の部分では、晩材部と早材部との間の細胞にのみサフランニン染色が確認でき (Fig.4(b)矢印)、その後の円盤ではサフランニン染色は確認されなかった (例えば、Fig.4(d))。

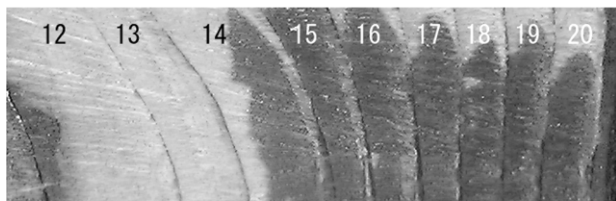
ここで、白線帯部における地上高別の水分通導状況の詳細を模式図にして表した (Fig.5)。ただし、これらの図は、Fig.4中の矢印部分を光学顕微鏡で観察し、簡単に模式化したものである。 $H_{1.7} + 1.5\text{cm}$ の部分 (Fig.5(a)) では、



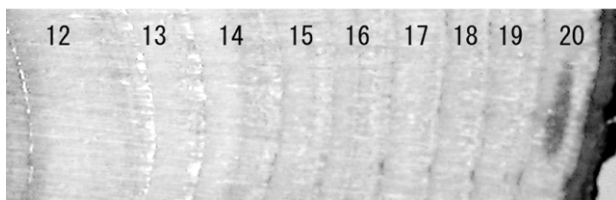
(a) $H_{1.7} + 1.5\text{cm}$.



(b) $H_{1.7} + 7.4\text{cm}$.



(c) $H_{1.7} + 19.5\text{cm}$.

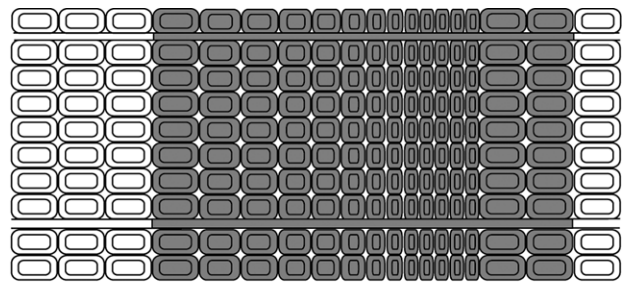


(d) $H_{1.7} + 91.7\text{cm}$.

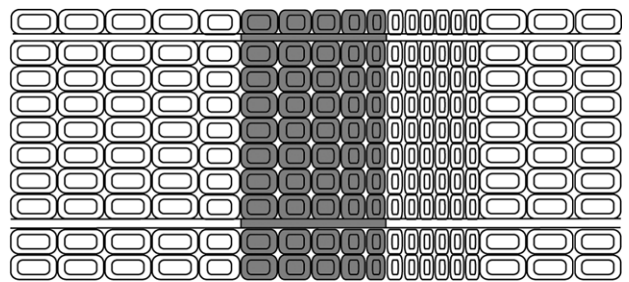
Fig.4. Examples of changes of the distribution of safranin dyeing in the cross section in the height direction.

Legend: $H_{1.7}$: The height 1.7m in road clearance, Numbers: Ages.

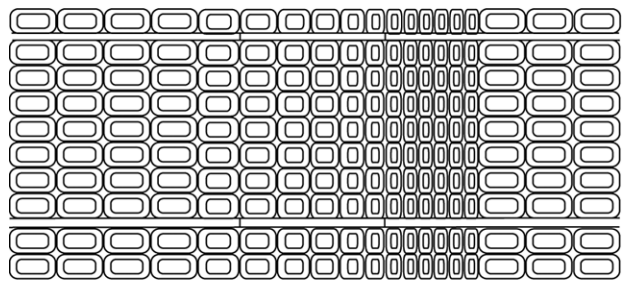
Note: The disks, in which thickness was about 4cm, were cut continually until the safranin dye was not accepted on the surface of the cross section.



(a) $H_{1.7} + 1.5\text{cm}$.



(b) $H_{1.7} + 7.4\text{cm}$.



(c) $H_{1.7} + 19.5\text{cm}$.

Fig.5. Schematics of the safranin dyeing of white zone in the height direction.

Note: (a) Latewood and a part of earlywood around the latewood were dyed, (b) The area between earlywood and latewood was only dyed, (c) There is no safranin dyeing.

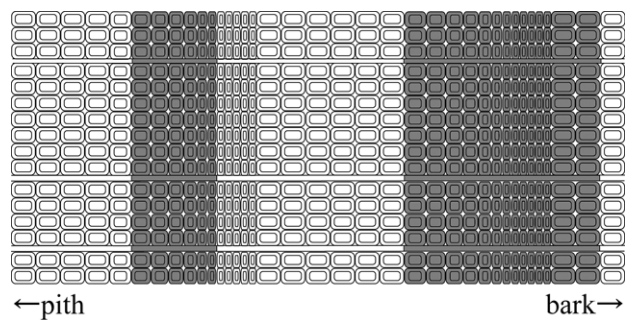


Fig.6. Schematic of the safranin dyeing in the cross section of white zone.

Note: In the bark side, latewood of current annual ring, earlywood, in which neighbor of the latewood, and earlywood of next annual ring were dyed, In the pith side: the area between earlywood and latewood was dyed.

晩材とその周辺の早材にサフラニン染色が確認されたが、 $H_{1.7} + 7.4\text{cm}$ の部分 (Fig.5(b)) では、早材部と晩材部との間の細胞にのみサフラニン染色が確認できた。 $H_{1.7} + 19.5\text{cm}$ (Fig.5(c)) 以降サフラニン染色は確認されなくなった。

以上の結果から、白線帯部で確認されたサフラニン染色は、樹液の通導に因るものではなく、毛細管現象に因るものであると考えられる。なお、昨年度同様、今回の実験においても、サフラニン染色が最も径の小さい晩材部ではなく、早材部と晩材部との境界部分で確認された。この原因としては、晩材部における仮道管の内腔のつぶれや何らかの物質の蓄積、などが考えられるが、さらに今後、データの蓄積と顕微鏡観察が必要であると思われる。

ここで、サフラニンを流し込んだすぐ上の部位 ($H_{1.7} + 1.5\text{cm}$) の横断面における、白線帯部のサフラニン染色の様子を模式化すると Fig.6 の通りである。樹皮側では、晩材部分、それに隣接した細胞 (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。

最後に、心材部分におけるサフラニン染色は、昨年度同様、全く確認されず、水分通導は行われていなかった。

参考までに、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、今回の供試木では約46.4%であった。また、樹液流量の速度を求めたところ、約1.7cm/時 (約110cm/約66時間) であり、昨年度の結果 (9.8cm/時、測定日: 2001年12月20日) に比べると非常に小さい値であった。この理由としては、今回の測定期間中の天候は曇りがちで、時々雨もあり、全般的に日照時間もすくなかったためであると思われる。

4. 結 論

スギ生立木の地上高170cm部位に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、前報と同様、辺材部では全体的に水分通導が行われており、心材部では、全く水分通導は行われていなかった。一方、白線帯部分では、電動ドリルでせん孔した上部約20cmの位置まではサフラニン染色が認められたが、それ以降は全くサフラニン染色が認められなかった。このことから、この部位において認められたサフラニン染色は、樹液の通導に因るものではなく、毛細管現象に因るものであると考えられた。

参考文献

- 1) Rudinsky, J. A., and Vite, J. P. (1959): Certain ecological and phylogenetic aspects of the pattern of water conduction in conifer, *For. Sci.*, 5, p.259-266.
- 2) 田中徹, 中井毅尚 (2002): スギ生立木における樹液流の通導路, 島根大学総合理工学部紀要シリーズ

A,36,pp.71-76.

- 3) 中山義男, 高橋徹 (1992): 木材科学講座3 物理 海青社, p.32-33.
- 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) 福島和彦他5名編 (2003), 木質の形成 - バイオマス科学への招待 -, 海青社, 333.
- 6) 日本木材学会 (1991): “木材の科学と利用技術Ⅱ, 5. スギ”, 日本木材学会, p.10-13.
- 7) R.Nakada, Y. Fujisawa and Y. Hirakawa (1999): Soft X-ray observation of water distribution in the stem of *Cryptomeria japonica* D. Don I: General description of water distribution, *J. wood Sci.*, 45(3), p.188-193.