

愛知演習林のコナラを対象にした樹液流の染色実験の報告

佐藤貴紀^{*1}・田中延亮^{*2}・井上淳^{*2}・澤田晴雄^{*2}・渡部賢^{*2}・鈴木雅一^{*1}

Report on an experiment of dye injection into xylem sap of a *Quercus serrata* tree in University Forest in Aichi.

Takanori SATO^{*1}, Nobuaki TANAKA^{*2}, Makoto INOUE^{*2}, Haruo SAWADA^{*2}, Suguru WATANABE^{*2}
and Masakazu SUZUKI^{*1}

要 旨

環孔材をもつ広葉樹であるコナラにおける樹液の上昇速度の辺材深さ方向の分布様式を調べるために、愛知演習林赤津研究林内に生育するコナラの樹冠木1個体を対象に樹液の染色実験を実施した。夏の午前中105分間の染色液の上昇高さと辺材深さとの関係を調べた結果、以下のことが確認された。1) 年輪幅数ミリ以下の樹皮側1年輪目（当年輪）における染色液の上昇速度は $610 \text{ cm } 105 \text{ min}^{-1}$ であり、当年輪以外の辺材における上昇速度（高々 $80 \text{ cm } 105 \text{ min}^{-1}$ ）と比較すると顕著に速い。2) 全ての辺材（地際高さ80 cmにおいて深さ38 mm）で染色液が上昇していた。3) おおむね、辺材深さが深くなるほど染色液の上昇が鈍くなる。このような辺材部における染色液の上昇速度の不均一な分布は、コナラの樹液の上昇流速が辺材深さによって大きく変化することを示唆する。本実験の結果を、環孔材をもつ広葉樹を対象にして樹液の上昇速度の辺材深さ方向の分布を調べた既往報告の結果と比較し考察を加えた。

キーワード：環孔材・染色実験・樹液流速・辺材深さ・コナラ

Abstract

A dye injection experiment in a canopy tree of *Quercus serrata*, which grew within Akazu Research Forest of University Forest in Aichi, was conducted with the purpose of investigating

*1 東京大学大学院農学生命科学研究科森林科学専攻

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*2 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林愛知演習林

University Forest in Aichi, University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

the radial variation of sap flow velocity of a ring-porous tree. The relationship between dye ascent height during 105-min of a summer morning and sapwood depth was examined. The result shows that 1) the maximum dye ascent height of 610 cm was found in the latest annual ring, the depth of which was less than several millimeters. On the other hand, in older annual rings, the dye ascent height was 80 cm at the highest. 2) The dye ascent was observed throughout the sapwood, and 3), in general, the ascent height decreased with increasing sapwood depth. The illustrated dye ascent variability within the sapwood suggests a pronounced radial variation in sap flow velocity in *Q. serrata* tree. The results of this experiment were discussed with previous studies that examined radial variation of sap flow in ring-porous species.

Keywords: ring-porous tree species, dye injection experiment, sap flow velocity, sapwood depth, *Quercus serrata*

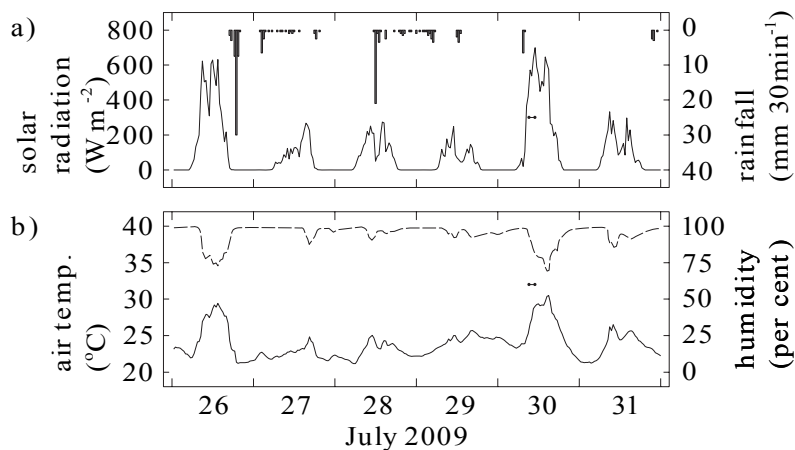
I. は じ め に

樹木の蒸散による水消費量を調べる方法の一つに、樹木辺材部の半径方向における樹液流の流速分布と辺材面積を調べ、その情報に基づいて、樹木個体全体の水消費量にスケールアップする方法がある（例えば、森川，1974）。辺材部半径方向における樹液流速の分布の把握には、ヒートパルスセンサーのような樹液流センサーを実験対象木の樹幹の複数深度に設置して、各深度の樹液流速を計測する方法（例えば、Miller *et al.*, 1980）や複数深度から採取した辺材サンプルの水分通道性を調べる方法（例えば、Zimmermann, 1978）があるが、より直接的な方法として、一定時間、樹液流を染色液で染色したのち、染色液の上昇距離を調べる方法（以後、染色実験。例えば、瀧澤ら，1996）がある。ただし、この染色実験では、実験対象木を伐倒して染色液の上昇距離を調べるため、時間連続的に樹液流速を計測することはできない。また、小径木や苗木など比較的サイズの小さい樹木を対象にした染色実験が多く（例えば、Umebayashi *et al.*, 2008；Chaney and Kozlowski, 1977）、実際の森林樹冠を構成するような大径木を対象にした染色実験の報告は比較的少ない。筆者らは、今後の樹液流に関する研究計画の立案とその実現可能性を探るために、愛知演習林内に生育するコナラの樹冠木（胸高直径23 cm，樹高約12 m）を対象にして、予備的な染色実験を実施した。同実験はあくまでも予備的であったとはいえ、上で述べたように、樹冠木を対象にした染色実験の結果は大変貴重であることから、ここにその結果を報告し若干の考察を加える。

II. 実験材料と手順

1. 実験材料

本実験は2009年7月30日に、東京大学愛知演習林の赤津研究林内のコナラ1個体を対象に実施した。同個体の樹高は約12 mであり、その林冠は周囲の他の樹冠木による林冠高さとはほぼ同程度であった。また、実験対象木の胸高直径は23 cmであった。実験実施日の前後（2009年7月26–31日）における、実験現場から北東に約200 m離れた同演習林白坂気象観測点での気象条件を図–1に示す。実験日の前日までの数日間、弱い雨が降り続き、日射量も低かった。実験当日の明け方に若干の降水があったものの、その後は天気が回復し、染色液を吸水させた時間帯（9時15分から11時00分までの105分間、図–1の黒丸で示された時間帯）には、雲間から日差しが見られるようになっていた。染色液を吸水させた時間帯における平均の日射量は 611.5 W m^{-2} 、気温は 28.1°C 、相対湿度は84.9 %であり、降水量は0.0 mmであった。



図–1. 東京大学愛知演習林白坂観測点における7月26日から31日までの日射量（実線）と降水量（棒）、b) 気温（実線）と相対湿度（破線）。図中の黒丸つきの横棒は、染色液の注入時間を表す。

Fig.1. Time series of a) solar radiation (solid line) and rainfall (bar), and b) air temperature (solid line) and humidity (dotted line) at Shirasaka Meteorological Station in University Forest in Aichi during 5-day from 26th to 31th of July, 2009. Bars ended with black circles indicate the period during which the dye injection was performed.

本実験では、樹液流が流動している部位を可視化するために、染色液（5 %濃度の酸性フクシン水溶液）を用いた。酸性フクシンは粒子が非常に細かいため、一般には、道管の通水を阻害させることはないといわれている。染色液を市販のプラスチック製の洗浄ビン（容量200 ml）に入れ、洗浄ビンから伸びたチューブの先には、シリコン栓を取り付けた（以後、染色液注入器）。このシリコン栓は、樹幹に開けた染色液の注入口に差し込むためのものであり、染色液が漏れな

いように、シリコン栓と樹幹の注入口は密着するようになっている。染色液注入器を樹幹に設けた注入口よりも高い位置に上下逆に固定し（写真－１）、洗浄ビンの底にキリ等で穴をあけることで染色液の注入を開始できるような構造になっている。



写真－１．対象木に取り付けた染色液注入器

Photo.1. A dye injecting apparatus set up to the examined oak.

2. 手順

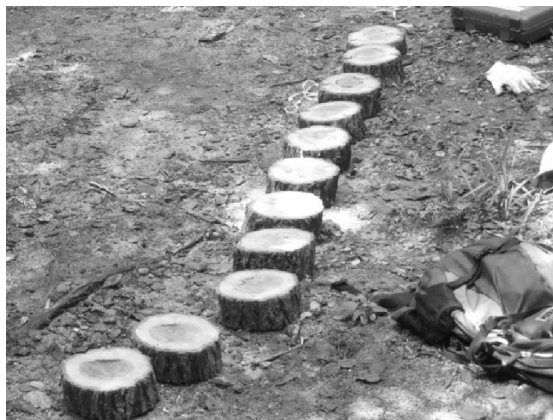
染色液の注入開始前に、実験対象木の幹の北側にチョークで縦線を引いた。これは、実験対象木を伐採し玉切りした状態においても、幹や円板の方位性を確認できるようにするためのものである。次に、染色液の注入口として、実験対象木の幹の北側と南側の２箇所、電動ドリルを使って直径8 mmの穴を設けた。穴を設ける際に、樹皮は取り除かず、樹皮の表面から深さ50 mmの穴を設けた。この注入口の穴は、実験対象木の心材まで達していた。注入口のうち、南側（山側）のものは地際から約30 cmの高さ、北側（谷側）のものは地際から約60 cmの高さであり、両注入口は水平面では同じ高さにあった。その後、各注入口より10 cmほど高い位置に、事前に用意した染色液注入器を固定してシリコン栓を各注入口にセットし、染色液の注入を開始した（写真－１）。注入開始時刻は、2009年7月30日9時15分で、注入終了時刻は同日11時00分で、総注入時間は105分であった。

染色液の注入終了後、チェーンソーを用いて実験対象木を地際10 cmで伐倒した。その際、チルホールを用いて、周囲の樹木を傷めないように留意した。伐倒後の染色液の上昇を止めるために、まず、注入口から150 cmの高さ（事前に想定していた染色液上昇の高さ）で対象木を切断

した（写真－２）。その後、チェーンソーを用いて、注入口から10 cm間隔で対象木を輪切りにして、厚さ10 cmの円板を作成した（写真－３）。ただし、次章で述べるように、染色液の上昇高さは、事前に想定していた染色液の上昇距離である150 cmを越えたため、160 cmより高い円板についても10 cm毎に採取してその上昇距離を調べた。円板作成作業と並行して、円板の断面で染色液が滲んで不明瞭になってしまうことを防ぐために、彫刻刀を使って染色部分を明確化するとともに、ボールペンで染色部分の輪郭を縁取った。最後に、各円板の断面をデジタルカメラで写真を撮り、記録とした。



写真－２．切断した長さ150 cmの丸太（北側の地際から70 cmから220 cmの高さ）
Photo.2. The 150-cm-long log excised at heights of 70 cm and 220 cm above the ground.



写真－３．作成した厚さ10 cmの円板
Photo.3. Sample segments with 10 cm in thickness.

Ⅲ. 結 果

染色液の注入が終了して、北側と南側の両染色液注入器を取り外した際、南側の注入口に染色液が満たされていなかった。これは、南側の注入口へ染色液を供給する染色液注入器のシリコン栓内に、電動ドリルで注入口を作成した際に生じたおが屑が詰まっていたことが原因であった。一方、北側の染色液注入口に関してはそのようなトラブルなく、染色液注入口に染色液が満たされている状態であった。作成した円板（写真－3）においても南側の染色液注入口からの染色液の上昇が認められなかったため、以下では、北側の染色液注入口から染色液が上昇した結果について述べる。

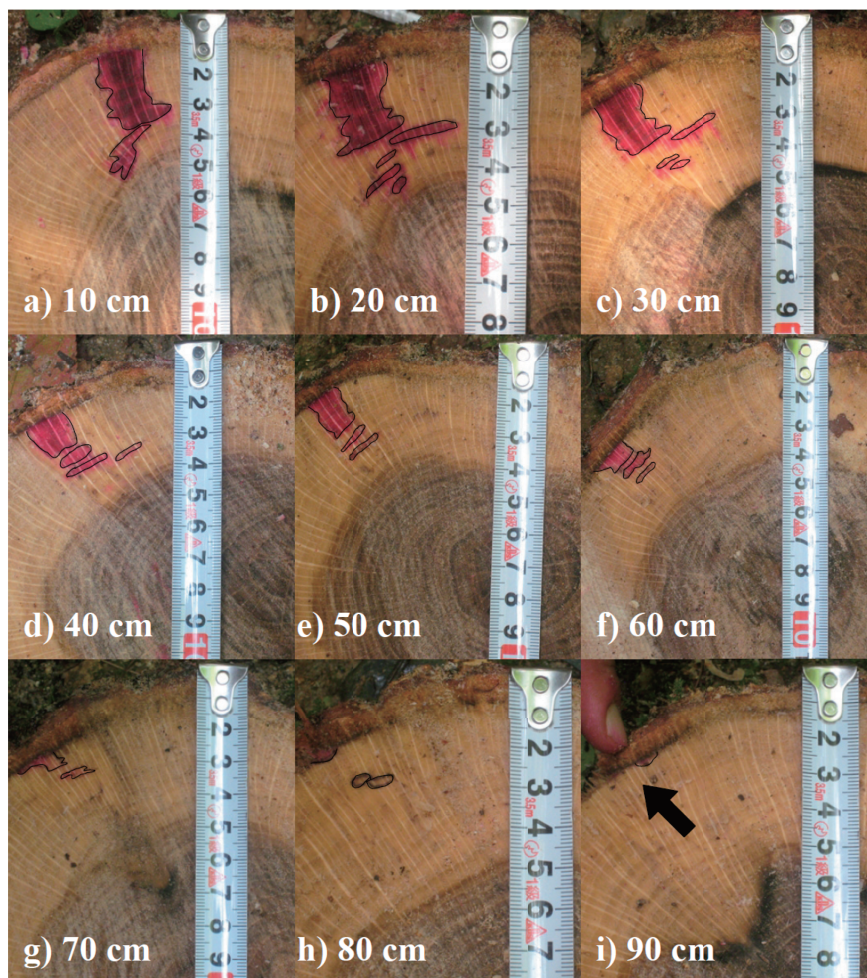
写真－4a-iに、染色液の注入口から10-90 cm高い位置で採取された円板断面を示した。赤く染まっている木部は、北側の注入口から上昇した染色液による染色部分を示している。これらの写真中のスケールの先端部分は、各円板の北側を指している。なお、円板採取時に黒ボールペンで縁取った染色部分の輪郭は、元画像では不鮮明であったため、写真－4には、パソコンの画像ソフトで輪郭を強調するように画像処理を行ったものを載せた。また、各写真には、これらの黒線からはみ出した赤い染色部分が散見されるが、これらは、実験時のボールペンによる輪郭の縁取り作業終了から写真撮影までの時間に、輪郭外に滲んだ染色液である。各円板とも染色部分は辺材に限られ、樹皮と心材での染色は確認できなかった（写真－4a-i）。

1. 染色液上昇の巡回性

写真－4a-fにおける染色部分とスケールの位置関係から、円板高さが60 cm（地際高120 cm）までは、円板高さが上昇すると染色部分が反時計周りに巡回することがわかる。もう少し詳細にみると、円板高さが10 cm上昇する度に、おおむね10度程度、染色部分は反時計回りに巡回していたが（写真－4a-f）、辺材深さ2 cm前後の位置に局所的に巡回性の低い部分（写真－4a-d）、辺材深さ3 cm前後の部分に巡回性の高い部分（写真－4a）など、例外的なパターンを示す部分があった。また、円板高さが60-90 cmの範囲では、染色部分の巡回は確認されず、ほぼ鉛直に染色液が上昇していた（写真－4g-i）。

2. 染色液の上昇高さ

図－2は、各高さの円板の樹皮の厚さ、辺材と心材の深さ、染色された辺材の深さを示したものである。辺材と心材の境界は、両者の色の違いにより判断した。染色液の注入口から10 cmの高さの円板では、すべての辺材深さが染色されていた。円板高さが20 cm以上では、おおむね、円板高さが上昇するにつれ、辺材深さにおいて深い部分から徐々に染色部分が消えていく傾向があった（図－2）。ただし、図－2の20-80 cmのすべての高さで見られるように、染色部分が



写真－４．円板断面の写真

Photo.4. Vertical cross-sections of sampled discs.

写真中の数字は染色液の注入口からの高さを表す。

Shown are the discs taken at heights of a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 60 cm, g) 70 cm, h) 80 cm, and i) 90 cm from the dye injection point.

辺材の深さ方向に対して不連続に分布する場合があった。図－２や写真－４からは読み取れないが、このような不連続な染色部分は年輪に沿って染色されており、１年輪内でも主に早材部が染色されることによるものだった。円板高さ90 cm以上では、染色部分は、実験実施年に形成された年輪（以後、当年輪）に限定されていた。図－２や写真－４では省略しているが、このような当年輪の染色は、円板高さ100 cmから高さ610 cmまで一貫して確認された。

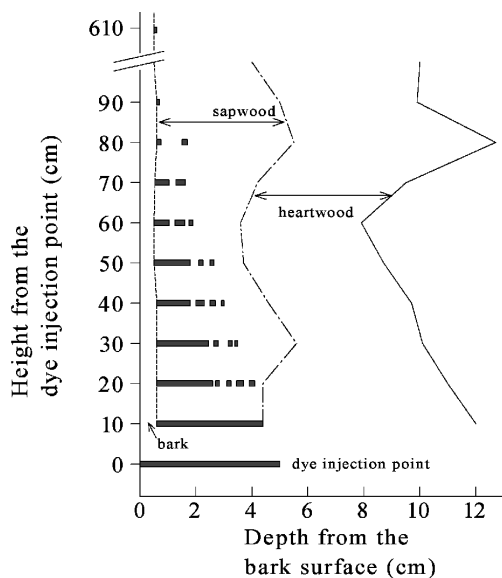


図- 2. 染色された辺材の深さと染色液注入口からの高さの関係。棒は染色された木部、点線は形成層、破線は辺材と心材の境界、実線は髄をそれぞれ表わしている。

Fig.2. Stained xylem depth as a function of height from the dye injection point. Stained xylem, cambium, sapwood-heartwood interface, and pith of each sample disc is denoted, respectively, by bar, dotted line, broken line, and solid line.

IV. 考 察

本実験では、円板高さ60 cm以下の範囲では染色液が旋回して上昇したが、円板高さが60–90 cmの範囲では染色液が鉛直に上昇していた。本実験と同じ酸性フクシンを用いたKozlowski and Winget (1963) やWaisel *et al.* (1972) の染色実験結果からは、コナラ属の樹木の樹液上昇の旋回性は低く、むしろ鉛直方向に上昇する傾向があると指摘している。同様の指摘は、Miller *et al.* (1980) によるクロガシワ (*Quercus velutina*) の樹液流測定の結果からもなされている。このような樹液上昇の旋回パターンは樹種によっても異なるが、同樹種であっても個体差の顕著な樹種があることから (Kozlowski and Winget, 1963), ここで示したコナラの樹液上昇の旋回パターンは、あくまでも一事例としてとらえたほうが良さそうである。

本実験で得た染色液の上昇と実際の樹液上昇とが対応しているとすれば、図- 2の結果は次のように要約できる。1) 当年輪 (円板高さ90 cmにおいて年輪幅数ミリ以下) における樹液上昇の速度は610 cm 105 min⁻¹であり、当年輪以外の辺材における上昇速度 (高々80 cm 105 min⁻¹) よりも顕著に速い。2) 全ての辺材 (円板高さ10 cmにおいて38 mm) で樹液が上昇していた。3) 全般的には辺材深さが深くなるほど樹液上昇が鈍くなるが、例外的なケースがある。

環孔材の辺材深さ方向への樹液上昇の分布を調べた既往研究は、主に冷帯および温帯の環孔材

を対象に行われてきた。例えば、Kozlowski (1961) は、環孔材では、当年輪が樹液上昇の中心的役割を担っているとしている。また、Miller *et al.* (1980) は、環孔材樹種のクロガシワの成木（胸高直径12 cm, 辺材深さ20 mm）を対象にヒートパルス法で樹液流速－辺材深さ関係を調べ、その樹液流速は形成層と接している辺材部で最大で、辺材深さが深くなると減少し、辺材深さ10 mm（樹皮側5年輪分）より深い部分では樹液流がほぼ停止するとしている。また、Ellmore and Ewers (1986) は、環孔材樹種のアメリカーニレ（*Ulmus americana*）の稚樹の木部サンプルの水分通道性を測定し、当年輪を流れる樹液流量は、個体全体の樹液流量の90 %以上を担うと報告している。Granier *et al.* (1994) は、環孔材樹種のセシルオーク（*Quercus petraea*）の成木（胸高直径11.9 cm, 辺材深さ19 mm）の樹液流速をグラニエ法で調べ、樹皮側の11 mmの辺材が個体全体の樹液流量の80 %を占めたと報告した。Čermák *et al.* (1992) は、ヨーロッパナラ（*Quercus robur*）の大径木（胸高直径30 cm）と小径木（同8 cm）を対象にした染色実験をおこない、両個体ともに、当年輪における染色液の上昇速度は 40 m h^{-1} であったが、辺材深さが深くなるにしたがって上昇速度が急激に低下し、辺材深さ20 mmより深い部分では染色液の上昇はなかったとしている。Chaney and Kozlowski (1977) は、環孔材樹種のアメリカーネリコ（*Fraxinus americana*）の3年生の苗木を対象に染色実験を行い、染色液の上昇は、ほぼ当年輪に限定されるとしている。日本の環孔材をもつ広葉樹を調べた事例を見ると、Umebayashi *et al.* (2008) は、日本の冷温帯に生育する広葉樹44樹種の染色液上昇を網羅的に調査した中で、ミズナラ（*Quercus crispula*）等の環孔材樹種（胸高直径3.0–7.0 cm）8樹種の染色液上昇を調べており、最も高い染色液の上昇は当年輪（個体によっては、当年輪と樹皮側2年輪目）で確認されたとしている。黒田・山田 (1996) は、コナラ（胸高直径と辺材深さ不明）の樹幹に開けた深さ20 mmの注入口より染色液を注入した結果、染色液上昇は当年輪において最も高かったことを指摘している。以上のすべての結果は、本実験で示した、当年輪が樹液上昇が最も顕著であるという結果と一致する。例外的な結果として、Phillips *et al.* (1996) は環孔材樹種ホワイトオーク（*Quercus alba*）の大径木（胸高直径不明）の樹液流速をグラニエ法で調べ、辺材深さ0–20 mmと20–40 mmの樹液流速には明瞭な差は無かったとしている。ただし、Phillips *et al.* (1996) も指摘しているように、樹皮側1年輪目の速い樹液流速が辺材深さ0–20 mmの樹液流速の測定値に正確に反映されているかという点に疑問が残る。

一般には、上で挙げたような環孔材の当年輪での顕著な樹液流上昇は、同年輪の早材部の大径道管の高い通水機能によって維持されているとされ、逆に、樹皮側2年輪目以前の大径道管は通水機能を持たないとされる（例えば、Ellmore and Ewers, 1986 ; Umebayashi *et al.*, 2008）。本実験のコナラで観測された当年輪における顕著な樹液流上昇も、当年輪の大径道管によるものと推察されるが、より厳密には、肉眼ではなく組織レベルでの詳細な観察が必要である。また、上で述べた環孔材の樹皮側2年輪目以前の大径道管が通水機能を失う原因としてしばしば挙げられ

るものは、大径道管内の水分の凍結・融解に伴って発生する気泡による道管閉塞である (Tyree and Sperry, 1989; Cochard and Tyree, 1990; Utsumi *et al.*, 1999)。一般に、辺材の組織中の水分が凍結するためには、気温が -10°C から -8°C よりも低下する必要があるとされる (Sakai and Larcher, 1987)。本実験の実施場所から約200 m離れた白坂気象観測点における1941年から2009年の年最低気温を見ると、年最低気温が -10°C を下回することは稀であるが、多くの年で -8°C を下回っていることがわかる (図-3)。本実験では、樹皮側2年輪目以前に形成された

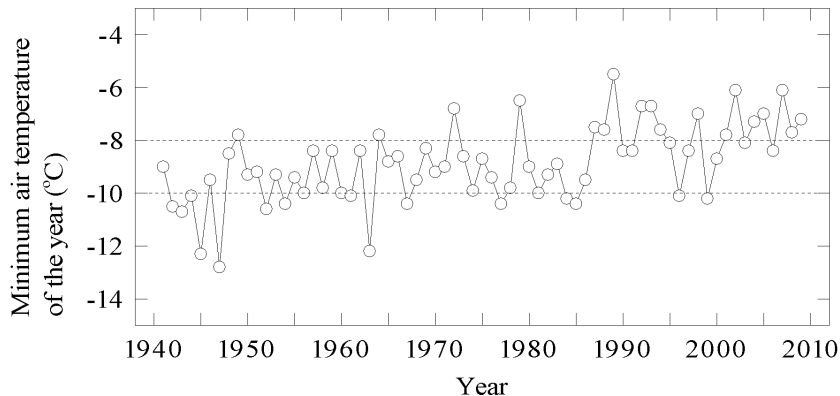


図-3. 白坂観測点での年最低気温

Fig.3. Long-term trend of annual minimum air temperature at Shirasaka Meteorological Station for the 1941–2009 period.

年輪では、当年輪のような顕著な樹液流上昇が見られなかったことから、実験対象となったコナラにおいても、過去において通水組織内の水分の凍結・融解を原因として発生した気泡による大径道管の閉塞が起きていた可能性が示唆される。ただし、赤津研究林において、2008年から2009年にかけて生理活動の休止期における最低気温も -8°C を上回っているにも関わらず (図-3)、樹皮側2年輪目以前に形成された年輪では、当年輪のような顕著な樹液流上昇が見られなかったこと、また、赤津研究林において1987年頃から年最低気温が -8°C を上回る頻度が高くなっていること (図-3) を考慮すると、同研究林に生育するコナラで、実際に凍結・融解を原因とする大径道管の閉塞が起きているかどうかは、今後、より慎重な検討を必要とする点である。

本実験では、当年輪ほど顕著ではないが、当年輪以外の全ての辺材 (円板高さ10 cmにおいて38 mm) で、染色液が上昇することを確認した (図-2, 写真4)。これは、古い道管であっても辺材部にあれば何らかの通水機能を維持していることを示唆する。一般には、環孔材の早材あるいは晩材の小径道管は、上で述べたような大径道管に比べて通水性は低いですが、凍結・融解時に発生する気泡による道管閉塞を起こしにくく (Cochard and Tyree, 1990)、数年以上の長期に渡って通水機能を維持し続けるとされている (Umebayashi *et al.*, 2008)。本実験における樹皮側2

年輪目以前の樹液上昇は、このような小径道管によるものと推察される。このような小径道管によると考えられる通水機能が維持される年数については、本実験で染色部分の年輪数のデータを取得しなかったため不明である。

本実験では、当年輪以外の辺材において、おおむね、辺材深さが深くなるほど染色液の上昇が鈍くなる傾向があった（図－2）。これは、古い辺材ほど通水機能を持たない道管が多くなり、しだいに樹液の通水性が低下することを意味する。上で述べたPhillips *et al.* (1996) のような例外的な結果もあるが、環孔材を取り扱った他の多くの研究では、本実験の結果と同様に、辺材深さが深くなるほど樹液上昇が鈍くなるとしている（Miller *et al.*, 1980 ; Čermák *et al.*, 1992 ; Granier *et al.*, 1994）。このような全体的な傾向とは別に、本実験では、辺材の深さ方向に対して染色部分が不連続に分布する場合があるという結果を得た（図－2の円板高さ20–80 cmの染色部分を参照）。これは、実験対象となったコナラの辺材において、局所的に、新しい年輪よりも古い年輪で通水性が高い部分が存在することを意味している。また、このような現象は、古い年輪の早材部に限定して起きていたことから（第三章2節参照）、早材部にある道管の一部が長年に渡って水分通道機能を維持していることを示唆する。ただし、本実験で得た限られた情報からは、このような現象が何によってもたらされているのかは不明であり、その原因の解明のためには、多深度の辺材サンプルの道管直径の分布などの追加調査が必要と考えられる。

これまでの東京大学演習林内で樹木辺材における樹液流の分布を調べた研究は、針葉樹（仮道管材）や散孔材をもつ広葉樹を対象としてきた。例えば、森川（1974）は、田無試験地のヒノキ孤立木（胸高直径49 cm, 辺材深さ4.1–5.0 cm）を対象に、その樹液流速の辺材深さ方向の分布を調べ、少なくとも辺材深さ2.0 cmまでの樹液流速は均一であることを示した。さらに、この結果と、秩父演習林矢竹沢の42年生ヒノキ林におけるヒノキ11個体を対象にした染色実験の結果から、ヒノキの辺材深さ方向への樹液の通水能力は、辺材内ではほぼ一定であると推察している（森川, 1974）。同様に、瀧澤ら（1996）は愛知演習林赤津研究林のヒノキ1個体（胸高直径10.3 cm）を用いて染色実験を行い、辺材深さで0.8–1.0 cmの範囲でわずかに染色液の上昇速度は速かったものの、主に樹液が上昇する辺材部では、染色液の上昇速度が一定であったとしている。また、瀧澤ら（1996）は、同研究林内のタムシバ（*Magnolia salicifolia*, 胸高直径13.1 cm, 散孔材）についても染色実験を実施しており、髄の周りのごく一部分（円板の断面積の1 %）以外で染色液が上昇しており、染色液が上昇した部分ではその上昇速度はほぼ一定であったと報告している。いずれの場合でも、本実験で調べたコナラのように、当年輪で樹液上昇が最も顕著で、樹皮側2年輪目より古い辺材の樹液上昇が急激に低下するようなパターンとは異なっていることがわかる。このような、環孔材、散孔材、仮道管材の樹液の上昇速度の辺材深さ方向への分布パターンの比較については、他文献（例えば、Kozłowski, 1961 ; Phillips *et al.*, 1996 ; Umebayashi *et al.*, 2008）に詳しいので、そちらを参照されたい。

V. お わ り に

本実験は、樹冠を構成するような大径のコナラ（環孔材樹種）の辺材部における樹液の上昇速度の辺材深さ方向の分布様式を調べるため、愛知演習林赤津研究林に生育するコナラを対象に染色実験を行った。その結果、環孔材樹種の辺材部の樹液上昇パターンを調べた既往研究の結果とほぼ同様に、実験対象となったコナラの樹液の上昇流速が辺材深さによって顕著に変化していることが示唆された。冒頭で述べたように、樹木生理学や生態水文学の分野において、樹液流センサーを用いた樹液流速の連続的な測定結果と測定木の辺材面積から、樹木個体の水消費量にスケールアップする手法が盛んに採用されており（例えば、Zang *et al.* 1996）、この手法を環孔材樹種へ適用した事例もある（Oren and Pataki, 2001；Bréda *et al.*, 1995；Hölscher *et al.*, 2005）。ただし、樹液流センサーは、あくまでも辺材の特定の部分の流速を計測しているに過ぎないため、特に環孔材樹種を対象にする場合には、本稿で報告したような辺材部の不均一な樹液の流動を、樹液流センサーで正確に計測できているかを評価することが重要である。

引用文献

- Bréda, N., Granier, A., and Aussenac, G. (1995) Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) Tree Physiol. 15: 295–306.
- Čermák, J., Cienciala, E., Kučera, J., and Hällgren, J-E. (1992) Radial velocity profiles of water flow in trunks of Norway spruce and oak and the response of spruce to severing. Tree Physiol. 10: 367–380
- Chaney, W.R., and Kozlowski, T.T. (1977) Patterns of water movement in intact and excised stems of *Fraxinus Americana* and *Acer saccharum* seedlings. Ann. Bot. 41: 1093–1100.
- Cochard, H., and Tyree, M.H. (1990) Xylem dysfunction in *Quercus*: vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. Tree Physiol. 6: 393–407.
- Ellmore, G.S., and Ewers, F.W. (1986) Fluid flow in the outermost xylem increment of a ring-porous tree, *Ulmus americana*. Am. J. Bot. 73: 1771–1774.
- Granier, A., Anfodillo, T., Sabatti, M., Cochard, H., Dreyer, E., Tomasi, M., Valentini, R., and Bréda, N. (1994) Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. Tree Physiol. 14: 1383–1396.
- Hölscher, D., Koch, O., Korn, S., and Leuschner, C. (2005) Sap flux of five co-occurring tree species in a temperate broad-leaved forest during seasonal soil drought. Trees 19: 628–637.

- Kozlowski, T.T. (1961) The movement of water in trees. *For. Sci.* 7: 177–192.
- Kozlowski, T.T., and Winget, H. (1963) Patterns of water movement in forest trees. *Bot. Gazette* 124: 301–311.
- 黒田慶子・山田利博 (1996) ナラ類の集団枯死にみられる辺材の変色と通水機能の低下. *日林誌* 78: 84–88.
- Miller, D.R., Vavrina, C.A., and Christensen, T.W. (1980) Measurement of sap flow and transpiration in ring-porous oaks using a heat pulse velocity technique. *For. Sci.* 26: 485–494.
- 森川靖 (1974) ヒノキの樹液の流れ—林木の水分収支と関連して—. *東大演報* 66: 251–297.
- Phillips, N., Oren, R., and Zimmermann, R. (1996) Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring-porous tree species. *Plant, Cell and Environ.* 19: 983–990.
- Oren, R. and Pataki, D.E. (2001) Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests. *Oecologia* 127: 549–559.
- Sakai, A., and Larcher, W. (1987) Frost survival of plants: responses and adaptation to freezing stress. Springer Verlag, Berlin.
- 瀧澤英紀・窪田順平・塚本良則 (1996) 幹横断面における樹液流速分布. *日林誌* 78: 190–194.
- Tyree, M.T., and Sperry, J.S. (1989) Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 40: 19–36.
- Umebayashi, T., Utsumi, Y., Koga, S., Inoue, S., Fujikawa, S., Arakawa, K., Matsumura, J., and Oda, K. (2008) Conducting pathways in north temperate deciduous broadleaved trees. *IAWA J.* 29: 247–263.
- Utsumi, Y., Sano, Y., Funada, R., Fujikawa, S., and Ohtani, J. (1999) The progression of cavitation in earlywood vessels of *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* during freezing and thawing. *Plant Physiol.* 121: 897–904.
- Waisel, Y., Liphschitz, N., and Kuller, Z. (1972) Patterns of water movement in trees and shrubs. *Ecol.* 53: 520–523.
- Zang, D., Beadle, C.L., and White, D.A. (1996) Variation of sapflow velocity in *Eucalyptus globulus* with position in sapwood and use of a correction coefficient. *Tree Physiol.* 16: 697–703.
- Zimmermann, M.H. (1978) Hydraulic architecture of some diffuse-porous trees. *Can. J. Bot.* 56: 2286–2295.