

移植にともなう樹木の通水抵抗の変化

作田, 耕太郎
九州大学農学部林学科

玉泉, 幸一郎
九州大学農学部林学科

齋藤, 明
九州大学農学部林学科

<https://doi.org/10.15017/10943>

出版情報 : 九州大学農学部演習林報告. 80, pp.1-14, 1999-03-23. 九州大学農学部附属演習林
バージョン :
権利関係 :

移植にともなう樹木の通水抵抗の変化*

作 田 耕太郎**・玉 泉 幸一郎**・齋 藤 明**

抄 録

移植にともなう樹木の通水抵抗の変化を、ヒノキ、クロマツおよびタブノキの3樹種について比較した。

根鉢径を5 cm, 20 cmとして移植した苗の日中の単位葉面積あたりの蒸散速度 (T_r), 梢端部の木部圧ポテンシャル (Ψ_{leaf}), 地際部の木部圧ポテンシャル (Ψ_{stem}), および明け方の葉の木部圧ポテンシャル (BP) を移植直前から移植後2週間目まで測定し, これらの値から単位葉面積あたりの通水抵抗 (R_t) と地下部抵抗の割合 (R_r/R_t) を算出した。なお, Ψ_{stem} は直接測定できなかったので Bagged-Shoot 法を用いて推定した。

測定期間中の対照木の R_t と R_r/R_t は変化せずほぼ一定であったが, 移植木の R_t , R_r/R_t は移植直後にともに増加した。クロマツとタブノキの R_t の増加は急激で移植直後に対照木の30倍から120倍となり, R_r/R_t も0.9以上で移植1週間以内で鉢径にかかわらず蒸散は停止した。これに対し, ヒノキの R_t および R_r/R_t は緩やかに増大した。5 cm 処理は移植1週間後まで徐々に増加し, R_t が対照木の250倍, R_r/R_t が0.9に達したのちに蒸散を停止した。20 cm 処理には蒸散の停止は認められず, 移植2週間後の R_t は対照木の70倍, 地下部の割合は0.9であった。対照木の BP は測定期間中を通してほとんど変化しなかったが, 移植木の BP は R_t の変化と同様にクロマツとタブノキでは急激に低下し, ヒノキでは緩やかに低下した。翌春まで生残したヒノキの20 cm 処理の R_t は低下し, R_r/R_t も小さくなったが, 対照木までの回復は認められず夏期に向かって再び R_t の増加が認められた。

このように移植により通水抵抗は増加したが, その大きな原因は根の通水抵抗の増加であることが示され, さらに活着木においては根の通水抵抗の回復が確認された。また, 抵抗の変化には根鉢径と樹種による差が認められたが, その要因として鉢内の根量を規定する根の分岐形態などの種特性が関与していると予想された。

キーワード: 移植, 通水抵抗, 根量, 木部圧ポテンシャル, Bagged-Shoot 法

1. はじめに

移植された樹木においては 'planting shock' とよばれるさまざまな生理的变化が生じる (Coutts, 1980, 1981; Rook, 1972; 高橋, 1981). 'planting shock' は, 主として土壌から

* SAKUTA, K., GYOKUSEN, K. and SAITO, A. : Changes in the Tree Hydraulic Resistance through the Transplanting.

** 九州大学農学部林学科

Department of Forestry, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581

掘りとられることによって根に対する物理的な障害や乾燥などの大きな負荷が生じることに起因する (Kramer and Kozlowski, 1979). このため、移植木は蒸散に見合う量の吸水が困難となり水分状態が急激に悪化し、成長が停止して活着に至らずに枯死する場合もある。したがって、移植木の健全度を維持するためには移植による根の吸水機能の低下の原因を明らかにし、対策を講じる必要がある。これまでの移植に関する報告では、移植木の成長や葉の生理的特性などに関して、温度や水分などの生育環境の影響 (Rook, 1972)、移植後の土壌養分の影響 (Bar-Tal *et al.*, 1990)、あるいは移植時の生育ステージの影響 (Kjelgren and Cleveland, 1994) などの報告があり、根の吸水機能に関しては、移植木の運搬法の影響 (Bates and Niemiera, 1996; Harris and Bassuk, 1995) や根の損傷の影響 (Coutts, 1980) などの報告があるが、吸水機能の低下の原因について研究されたものは少ない。池田ら (1988) はクロマツ、アラカシ、クスノキを材料として移植を行い、根の木部における相対水分通導性の低下が移植木の水分状態に大きく影響していること、また種による木部の組織の違いによって低下の原因が異なることを明らかにした。しかし、彼らの研究は同一個体の継続的な測定ではなく、活着による根の通水性と水分状態の回復過程については言及されていない。また、根の通水性は根量と高い相関にある (Gardner, 1960) ことが知られており、根鉢の容積と根系密度によっても移植木の水分状態は大きく左右されると考えられるが、移植後の成長との関係 (Bar-Tal *et al.*, 1990) についての報告はみられるものの、根の通水性との関係についての報告はみられない。

本研究では、移植木の通水抵抗の変化を経時的にモニターするための手法を検討するとともに、この手法を用いて根鉢の大きさ、あるいは樹種による通水組織の違いが移植後の水分状態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 材料と方法

2.1. 通水抵抗の推定方法

樹木の通水抵抗は、 F (樹体の単位断面積を単位時間内に通過する水分量 ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)) が定常状態にあるとき、オームの法則のアナロジーから (1) 式で表される (Cowan, 1965; Philip, 1966) (図 1)。

$$R_{total} = (\Psi_{soil} - \Psi_{leaf}) / F \quad (1).$$

ここで、 R_{total} は根から葉にかけての通水抵抗 (MPa s m^{-1})、 Ψ_{soil} は根系表面の土壌の水ポテンシャル (MPa)、および Ψ_{leaf} は葉の水ポテンシャル (MPa) である。すなわち、 R_{total} は Ψ_{soil} と Ψ_{leaf} との落差をそのときの F で除することによって求められる。なお、高木の樹木の場合には Ψ_{leaf} から重力ポテンシャルを除外する必要があるが、丈の低い樹木では重力ポテンシャルの影響を無視することができる (Fitter and Hay, 1981)。さらに樹幹の地際部分の水ポテンシャル、 Ψ_{stem} (MPa) が決定されると、樹体地下部の通水抵抗 (R_{root}) は (2) 式によって求められる。

$$R_{root} = (\Psi_{soil} - \Psi_{stem}) / F \quad (2).$$

ここで、(1)、(2) 式より F を消去すると (3) 式となる。

$$R_{root} / R_{total} = (\Psi_{soil} - \Psi_{stem}) / (\Psi_{soil} - \Psi_{leaf}) \quad (3).$$

すなわち、 R_{root} / R_{total} は根系表面の土壌と葉の水ポテンシャル落差に対する根系表面

の土壌と樹幹地際部の水ポテンシャル落差の比として表され、移植前後の F 、 Ψ_{leaf} 、 Ψ_{soil} および Ψ_{stem} を立木状態で継続的に測定して R_{total} と R_{root}/R_{total} を推定し、移植木の水分状態との対応をモニターすることによって移植木の健全度が評価できると考えられる。

2.2. 供試木および移植方法

供試木には九州大学農学部構内に生育する6年生ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.)、5年生クロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.)、および3年生タブノキ (*Persea thunbergii* Sieb et Zucc.) の実生苗3個体ずつを使用した。供試木の樹高と地際直径の平均値と標準偏差は、ヒノキが 209.7 ± 3.2 cm と 5.2 ± 0.1 cm、クロマツが 152.0 ± 16.6 cm と 3.5 ± 1.0 cm、およびタブノキが 108.0 ± 11.3 cm と 1.9 ± 0.2 cm であった。それぞれの樹種について1個体を対照木として生育地点に残し、他の2個体を1993年10月11日に九州大学農学部構内の圃場内に設置されたコンクリートポット (容積: 247.4リットル) に移植した。移

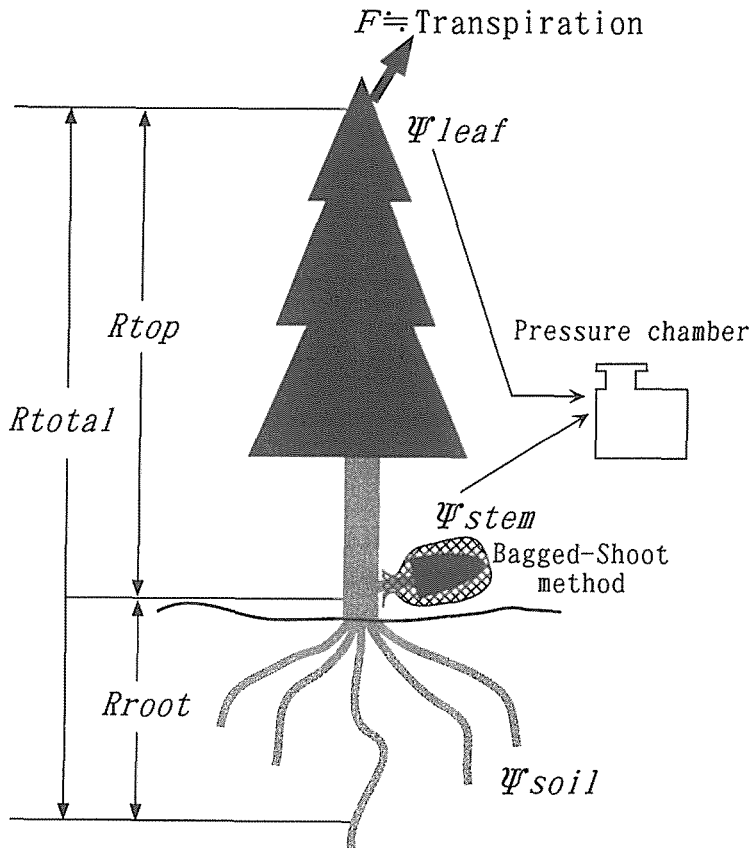


Fig. 1 The distribution of hydraulic resistance in a tree, and the outline of measuring method.

図1 通水抵抗の分布と測定の概要

植木の根鉢は皿鉢として、その大きさは半径と深さがそれぞれ 5 cm (体積 : 0.39 リットル) の「5 cm 処理」と、半径と深さがそれぞれ 20 cm (体積 : 25 リットル) の「20 cm 処理」とした。通常、常緑樹の移植は冬芽が伸長を開始する直前がもっとも適しており、秋に移植を行うと移植後の根系の回復が思わしくなく、水分不足を生じて枯死しやすくなるといわれている (上原, 1966)。そこで、本研究では移植後 2 週間目まで比較的短期間の変化に限定して測定を行い、活着後の測定は翌年に 1 本だけ生残したヒノキの 20 cm 処理についてのみ行った。

2.3. 蒸散速度および水ポテンシャルの測定

式 (1), (2) における F , Ψ_{leaf} , Ψ_{stem} , および Ψ_{soil} の各パラメーターの測定を、移植前の 1993 年 10 月 2 日、移植後は 2 週間目まで曇天、雨天日を除いて、対照木では 4 回、移植木では 7~9 回行った。また、2 週間の測定期間中には移植木に十分な灌水を行い、対照木については連続した晴天日がなかったことから灌水は行わなかった。

F には単位葉面積あたりの蒸散速度 (Tr) を使用した。通常、自然条件で生育する植物においては、昼間は水分損失が上回り、夜には水の吸収が上回るが、ヒマワリ (*Helianthus annuus*) を用いた実験では、正午過ぎからその差は小さくなり午後 4 時頃には蒸散速度と吸水速度がほぼ一致している (Mohr and Schopfer, 1969)。そこで、本研究においては日中 (午後 1 時より 3 時) に、自己庇陰を受けていない梢端部の当年生シュートおよび単葉の葉面コンダクタンス (G_s) を携帯式光合成蒸散測定装置 (SPB3, ADC, UK) で求め、同時に梢端部周辺の温湿度を温湿度計 (HN-K, Chino Works, Japan) で測定した。測定した温湿度より、(4) 式と (5) 式を用いて大気の水蒸気圧、(6) 式より飽差を求め (Landsberg, 1986)、さらに (7) 式より単位葉面積あたりの蒸散速度を算出した。

$$E_s(T) = 0.61078 \exp \{17.269T / (T + 237.3)\} \quad (4).$$

$$E_a = E_s(T) \times RH / 100 \quad (5).$$

$$D = E_s(T_f) - E_a \quad (6).$$

$$Tr = G_s \times D / P \quad (7).$$

ここで、 $E_s(T)$ は気温 T における飽和蒸気圧 (kPa)、 T は気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 E_a は大気の水蒸気圧、 RH は相対湿度 (%), D は飽差 (kPa)、 T_f は葉面温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 Tr は単位葉面積あたりの蒸散速度 ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 G_s は単位葉面積あたりの葉面コンダクタンス ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、および P は大気圧 (kPa) である。なお、本研究においては T_f を測定することができなかったため、 T_f は T に等しく、さらに、気孔内空隙の空気は水蒸気で飽和していると仮定して D の算出を行った (Landsberg, 1986)。これらの測定と同時に梢端部の葉の木部圧ポテンシャルを日中の Ψ_{leaf} の代用 (以下、 Ψ_l) として、また Bagged-shoot 法によって供試木地際の枝の葉の木部圧ポテンシャルを Ψ_{stem} の代用 (以下、 Ψ_s) としてプレッシャーチャンバー (DIK-7000, 大起理化工業, 東京) を用いて測定した (Sholander *et al.*, 1965)。Bagged-Shoot 法は幹より分枝した枝に光と外気との通気を遮断する袋を明け方前に掛けることで、葉からの蒸散を抑制して枝内の水ポテンシャルの勾配をなくし、この状態で測定される木部圧ポテンシャルと分枝部の幹の水ポテンシャルが等しいとみなして、分枝部の Ψ_{stem} を推定する方法である (Turner, 1981; Neau and Inra, 1987; 小林ら, 1993; 沖津ら, 1994; 瀧沢ら, 1996)。さらに、明け方の梢端部の葉の木部圧ポテンシャル (BP)

をプレッシャーチャンバー法で測定して供試木の水分状態の指標とした。 Ψ_{soil} については、樹高の低い樹木において土壌との間に水移動が生じていなければ、 BP と近い値となると考えられる（玉泉・須崎, 1983）ので、対照木の R_{total} の算出には BP を Ψ_{soil} の代用とした。移植木については、根量が大きく減少していることから Ψ_{soil} とに BP に大きな差が生じる可能性が高い。そこで、標準状態の純水の水ポテンシャルは 0 であり（Mohr and Schopfer, 1969; Fitter and Hay, 1981）、また 2 週間の測定期間中は十分な灌水を行ったことより、 Ψ_{soil} を 0 とみなして算出した。 G_s は、各供試木について 3 枚の葉もしくはシュートをラベルして同一の試料によって測定を行い、 Ψ_{leaf} 、 Ψ_{stem} および BP については、それぞれ 2~3 回の繰り返しを行った。通水抵抗の算出にはこれらの平均値を用いた。なお、(1)、(2) 式の R_{total} と R_{root} は単位幹断面積あたりの抵抗として算出されるが、本研究では Tr を用いたので、単位葉面積あたりの抵抗として示されることになる。そこで、それぞれ R_t （単位葉面積あたりの通水抵抗）、 R_r （単位葉面積あたりの根の通水抵抗）を使用した。また、移植直後の測定は移植 2 週間目までとしたが、翌 1994 年 4 月 13 日、14 日、17 日、30 日、6 月 27 日、および 7 月 28 日に対照木と生残した移植木について同一の測定を行った。ただし、生残木の Ψ_{soil} については灌水を移植 2 週間目で停止したため、対照木の BP を使用し、また G_s については、測定日ごとに異なる葉またはシュートを使用した。

3. 結 果

3.1. 明け方の水ポテンシャル、日中の水ポテンシャルと蒸散速度

図 2 に BP 、 Ψ_l および Tr の変化を示した。移植前の BP は全ての供試木で $-0.1 \sim -0.2$ MPa の範囲にあり、対照木の BP は 3 樹種ともに測定期間を通して大きな変化は認められなかった。しかし、移植木の BP は全ての樹種、処理で徐々にあるいは急激に低下した（図 2 (a), (b), (c)）。ヒノキの BP は他の 2 樹種よりも緩やかに低下し、5 cm 処理では移植 1 週間後に -1.5 MPa、2 週間後に -2.0 MPa まで低下したが、20 cm 処理の BP は移植 1 週間後に -0.6 MPa、2 週間後で -0.8 MPa の低下にとどまり、明確な処理間差が認められた（図 2 (a)）。クロマツは最も急激に低下し、5 cm 処理では 1 週間後に -2.0 MPa、2 週間後で -2.2 MPa となり、20 cm 処理では 1 週間後には -1.8 MPa、2 週間後で -2.1 MPa に低下したが、処理間差は明瞭でなかった（図 2 (b)）。タブノキは、移植翌日は対照木と同程度の値を示したが、2 日目以降はヒノキとクロマツの中間的な速さで低下した。処理間では、5 cm 処理で 1 週間後に -1.2 MPa、2 週間後で -2.2 MPa に達し、20 cm 処理では 1 週間後には -0.9 MPa、2 週間後で -2.1 MPa であった。このように 20 cm 処理で常に高い値を維持したが、2 週間後の値に処理間差は認められず、ともに -2.0 MPa 以下の値を示した（図 2 (c)）。

対照木の Ψ_l は、3 樹種ともに -1.0 MPa ~ -1.5 MPa の範囲であった。移植木の Ψ_l は樹種、処理にかかわらず移植翌日から対照木の測定値よりも低い値であり、また常に 20 cm 処理よりも 5 cm 処理で低い値であった（図 2 (d), (e), (f)）。 BP の低下が緩やかであったヒノキの、5 cm 処理では Ψ_l は移植翌日に -2.1 MPa まで低下し、その後変動しながら 2 週間後に -2.3 MPa となった。20 cm 処理では -1.7 MPa ~ -1.9 MPa の範囲で変動し、

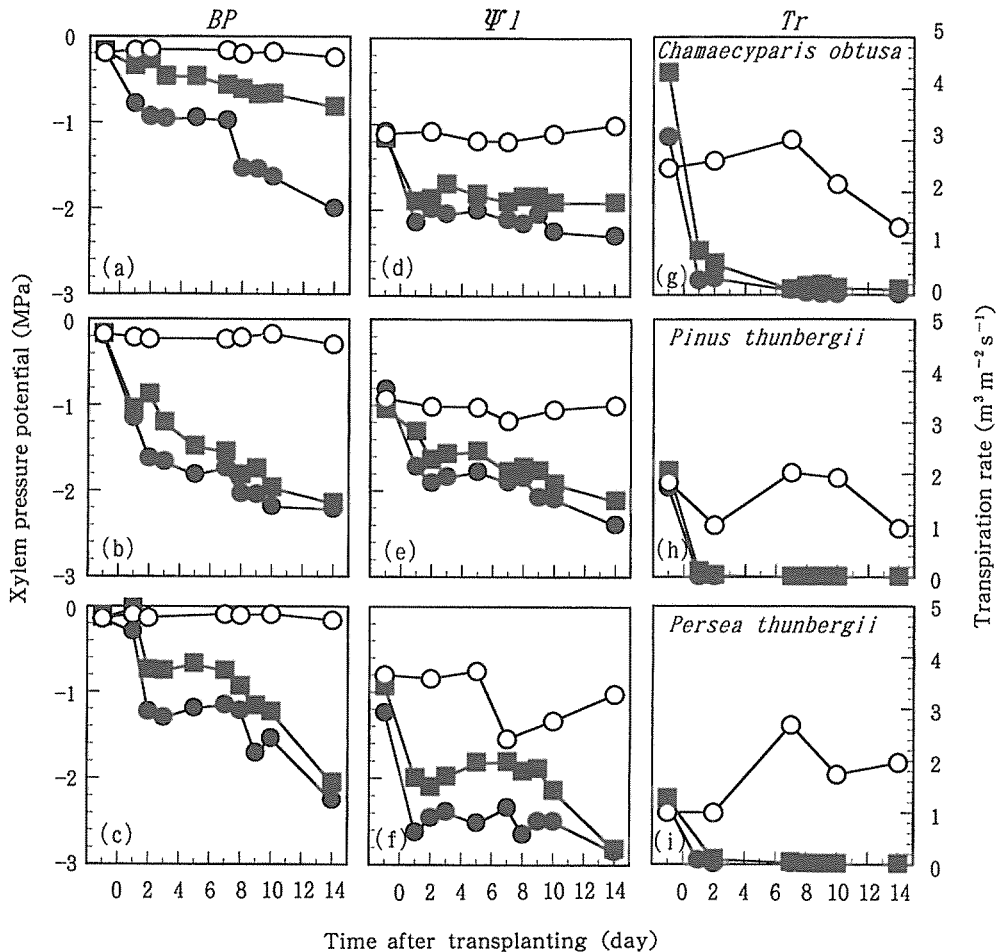


Fig. 2 Changes of predawn leaf xylem pressure potential (BP), midday leaf xylem pressure potential (Ψ_l) and transpiration rate (Tr).

note: Open circles show the control trees. Closed circles and squares show the 5 cm and 20 cm treated trees, respectively. Panel (a), (d) and (g) show the BP , Ψ_l and Tr of *Chamaecyparis*. Panel (b), (e), (h), (c), (f), and (i) show those of *Pinus* and *Persea*.

図2 移植ともなう明け方の水ポテンシャル (BP), 日中の水ポテンシャル (Ψ_l) および単位葉面積あたりの蒸散速度 (Tr) の変化

-2.0MPa 以下にはならなかった (図2 (d)). BP がもっとも急激に低下したクロマツの 5 cm 処理では移植翌日に -1.7MPa, 2 日目に -2.0MPa となった後, 8 日目までは -2.0MPa 前後の値となり, その後 -2.4MPa まで徐々に低下した. 20 cm 処理では移植翌日に -1.3 MPa, 2 日目に -1.6MPa となった後, 5 日目までは -1.5MPa 前後の値となり, その後 -2.1MPa まで徐々に低下した (図2 (f)). BP の低下が中間的であったタブノキの 5 cm 処理では, 移植翌日に -2.6MPa と急激に低下し, その後は -2.5MPa 前後の値で変動し, 14 日目の値は -2.9MPa と移植木中もっとも低い値となった. 20 cm 処理は移植翌日から

-2.0MPa 前後の値となり、14 日目には -2.8MPa であった (図 2 (d)). このように、移植木の水ポテンシャルは対照木よりも低い値となり、低下のパターンには樹種による差が認められた。また、処理間を比較した場合には樹種にかかわらず根鉢の大きな 20 cm 処理が常に 5 cm 処理よりも高い値であった。

対照木の Tr は、 BP 、 Ψ_l よりも変動が大きかったものの、測定期間中は常に $1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上であった。これに対して、移植木の Tr は移植翌日から急激に低下し、ヒノキの 20 cm 処理を除いて測定期間中に 0 となった (図 2 (g), (h), (i)). Tr の低下はクロマツで最も急激であり、5 cm 処理で翌日、20 cm 処理でも 3 日目には 0 となった (図 2 (h)). タブノキでは、5 cm 処理で 2 日目、20 cm 処理は 7 日目に 0 となった (図 2 (i)). ヒノキでは Tr の低下がもっとも緩やかであり、5 cm 処理の Tr が 0 となったのは 9 日目、20 cm 処理は 14 日目においても蒸散を継続し、その値は $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と対照木 ($1.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) の 10 分の 1 以下であった (図 2 (g)).

3.2. R_t と R_r/R_t の変化

図 3 に R_t と R_r/R_t の変化を示した。いずれの樹種においても対照木の R_t の変動は小さく、ほぼ一定の値で推移した。これに対し、移植木の R_t は移植直後から増加した (図 3 (a), (b), (c)). ヒノキの R_t の増加は比較的緩やかに生じた。5 cm 処理では移植翌日に移植前の 22 倍、1 週間目には 71 倍となり、8 日目に急激に増加した。一方、20 cm 処理では R_t の増加は 5 cm 処理よりもより緩やかに生じ、移植翌日では移植直前の 8 倍、1 週間目以降は 70 倍前後で推移した (図 3 (a)). クロマツは移植後早期に蒸散を停止したために、 R_t は 20 cm 処理の移植翌日と 2 日目のみが算出され、移植翌日では対照木の 25 倍、2 日目では 113 倍となった (図 3 (b)). タブノキはクロマツと同様に比較的早期に移植後の蒸散を停止した。5 cm 処理においては、 R_t は移植翌日に対照木の 32 倍となり、その後は蒸散が停止したために R_t を算出できなかった。20 cm 処理では R_t は直線的に増加し、移植 2 日目で対照木の 31 倍、1 週間目で 79 倍となった (図 3 (c)). R_r/R_t は、3 樹種ともに移植前には 0.5~0.6 の範囲にあった。対照木の R_r/R_t は、測定期間を通して 3 樹種ともに 0.5~0.6 を維持したのに対して、移植木ではすべての樹種と処理で増加した (図 3 (d), (e), (f)). R_t の増加が緩やかであったヒノキは、 R_r/R_t の増加も緩やかであった。処理間では、 R_t の増加が急激であった 5 cm 処理で R_r/R_t も急激に増加し、移植 1 週間後で 0.88、2 週間後で 0.97 となった。 R_t の増加が緩やかであった 20 cm 処理では R_r/R_t も緩やかに増加して移植 1 週間後で 0.72、2 週間後で 0.93 となった (図 3 (d)). これに対し、移植後 1 週間以内に蒸散を停止したクロマツとタブノキは、 R_r/R_t はヒノキよりも急激に増加した。クロマツでは、根鉢の大きさにかかわらず移植翌日に急激に増加して 0.95 前後の値となった (図 3 (e)). タブノキでは若干の処理間差が認められ、20 cm 処理が 5 cm 処理よりも小さく、5 cm 処理は移植翌日から 0.95 前後、20 cm 処理 0.8 から 0.95 の範囲で推移した。(図 3 (f)).

3.3. 生残木の R_t 、 R_r/R_t および BP の変化

移植木のうち翌春まで生残したのはヒノキの 20 cm 処理の 1 個体のみであった。図 4 にヒノキ対照木と生残木の、移植から翌 1994 年 7 月までの R_t (図 4 (a)), R_r/R_t (図 4

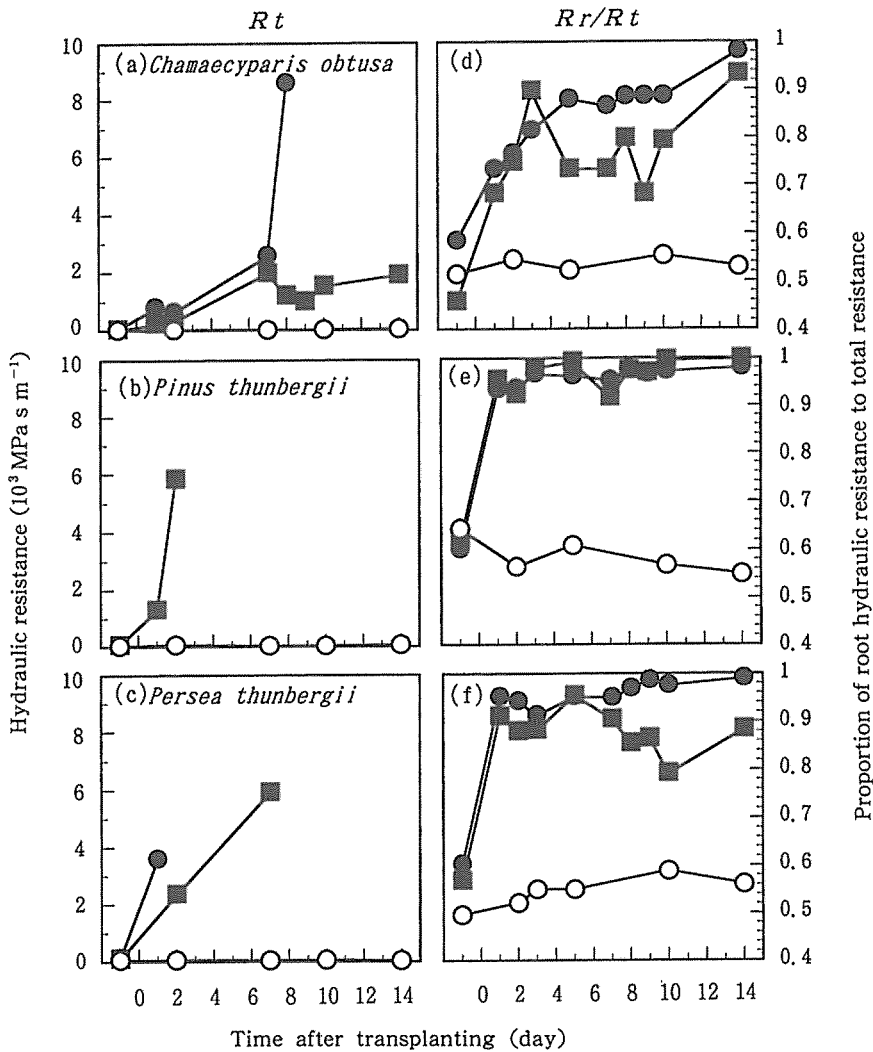


Fig. 3 Changes of hydraulic resistance (R_t), and proportion of root hydraulic resistance to total resistance (R_r/R_t).

note: Panel (a) and (e) show the R_t and R_r/R_t of *Chamaecyparis*. Panel (b) and (e), (c) and (f) show those of *Pinus* and *Persea*. The symbols are same as in Fig. 2.

図3 移植にともなう通水抵抗と根の通水抵抗の割合の変化

(b)), および BP (図4 (c)) の変化を示した。対照木の R_t は、前年とほぼ変わらなかったが7月(移植287日目)に前年の5倍に増加した。生残木の R_t は、2週間後には対照木の70倍まで増加したが、4月(移植184~201日目)には2倍まで回復した。しかし、6月には5倍まで再び増加した。7月(移植287日目)では蒸散を停止したため R_t の算出は不可能であった(図4 (a))。 R_r/R_t は、対照木では前年と比べてわずかに小さくなり、0.40ほどの値で推移したが7月に大きくなった。生残木では、4月には0.7~0.8まで回復

したが6月には再び0.9まで大きくなり、7月には逆に0.3まで小さくなった(図4(b)).
 生残木のBPは、移植2週間目に-0.9MPaまで低下したが4月には-0.3~-0.4MPaまで

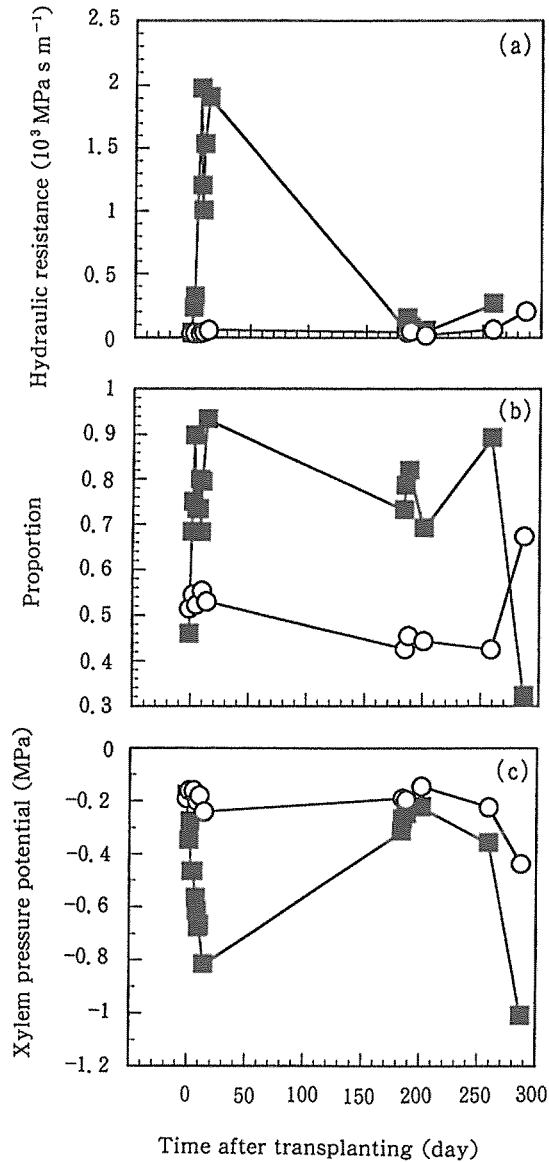


Fig. 4 Changes of hydraulic resistance per unit leaf area (a), proportion of root hydraulic resistance to total resistance (b), and predawn xylem pressure potential (c) in control and 20 cm treated *Chamecyparis* trees.

note : The symbols are same as in Fig. 2.

図4 ヒノキ対照木と20cm処理木の移植ともなう葉面積あたりの通水抵抗、全通水抵抗にしめる根の抵抗の割合および明け方の木部圧ポテンシャルの変化

回復し、対照木の -0.2MPa に近くなった。しかし、対照木で -0.4MPa まで低下した7月には -1.0MPa まで低下し(図4(c))生残木はその後急速に枯死した。

4. 考 察

4.1. 移植による R_t , R_r/R_t , および BP の変化

移植木の R_t , R_r/R_t は増加し、また BP は低下した。さらに、これらの変化には樹種間あるいは処理間の差が認められた(図2, 3)。移植木において認められた R_t , R_r/R_t の増加の要因としては、第一に根切りによる根量の減少があげられる。根系の通水抵抗は根量と密接な関係にあることが指摘されており、特に根長や根系表面積と反比例関係にある(Cowan, 1965)。ヒノキ移植木において見られたように、20 cm 処理の R_r/R_t の増加は5 cm 処理よりも小さかった(図3)。これは根鉢の体積を大きくすることによって、より多くの根が根鉢内に残存した結果と考えられる。本研究では、根鉢の大きさを根量を規定したため正確な根量の比較はできないが、根量が多い方が移植時の根系の通水抵抗の上昇は抑制され、致命的な樹体の水分状態の悪化を免れやすいといえる。

樹種間で移植後の通水抵抗や水分状態の変化が異なった要因としては、根鉢内の根量を規定する根系の分岐形態のような外観的構造(Fitter, 1987)や根系内部の木部などの組織構造の種間差(池田ら, 1988)が考えられる。ヒノキでは、 BP の低下は他の2樹種よりも比較的緩やかに生じた(図2(b))。ヒノキの根系には太根は発達しないが、根元に細根を密生している(菊住, 1979)ため、根切りによる根量の減少の影響が小さかったと判断される。これに対して、クロマツとタブノキの根系は、太根が発達して細根の形成は顕著でない(菊住, 1979)。したがって、根切り後に根鉢の中に残存できる根系は比較的に太い根が多く、吸水に有利である細根が極端に少ない状態となる。さらに、クロマツでは樹脂道が発達しており、切断面が樹脂や土壌粒子によって閉鎖する(池田ら, 1988)。またタブノキでは、物理的な障害を受けると道管内にチロース芽を発生すること(池田ら, 1988)などが根量の減少とともに、種間差を引き起こした要因となったと考えられる。このような根系の外観的な構造や解剖学的特性の違いは、移植木の根鉢のサイズや形を決定する際の重要な因子と考えられる。従来用いられている根鉢サイズの決定方法(上原, 1966)では、移植木の根元直径のみを算定基準としているため、今後は、樹種ごとの根系形態を考慮した移植鉢の決定法についての研究が必要と考える。

4.2. 生残木の R_t , R_r/R_t および BP の変化

移植翌年に生残したヒノキの20 cm 処理の R_t は、移植2週間目に対照木の70倍に達したが翌年4月(移植184~201日目)には1.7~5.3倍まで回復し(図4(a))、 R_r/R_t も0.93まで大きくなった後、0.69~0.81まで回復した(図4(b))。また、 BP は -0.82MPa まで低下したが $-0.22\sim-0.31\text{MPa}$ 前後まで回復した(図4(c))。しかし、回復は十分ではなく対照木よりも R_t と R_r/R_t は大きく、また BP は常に低い値で推移した。回復の状況を詳しく検討するために、4月の測定値を用いて算出した R_{tp} (単位葉面積あたりの地上部の通水抵抗)と R_r の平均値を図5に示した。生残木の R_{tp} は対照木と同じ程度であったが、 R_r は対照木の3.8倍で、根の通水抵抗のみが大きかった。このことから、生残木

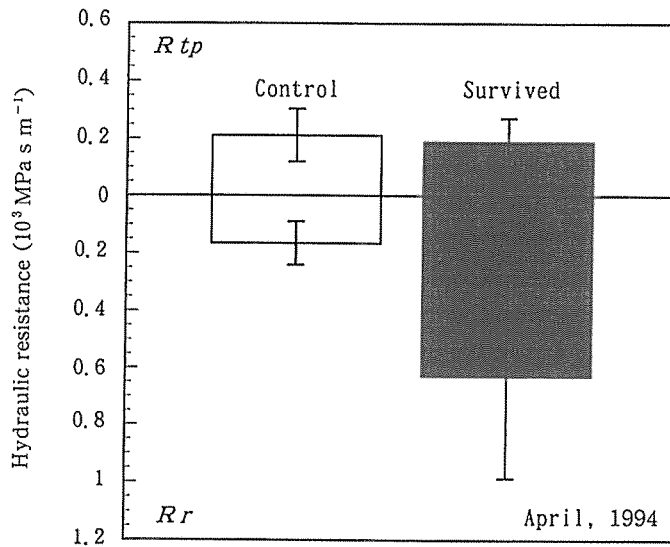


Fig. 5 The distribution of hydraulic resistance in top and root portion under the *Chamaecyparis* trees.

note : Blank and gray bars show the top (R_{tp}) and root (R_r) hydraulic resistance in the control and survived *Chamaecyparis* trees, respectively. Data are the average of the measurement carried out in April, 1994. And vertical lines show the standard deviation.

図5 1994年4月のヒノキ対照木と生残木の地上部と根の通水抵抗の分布

では活着後も R_r が大きいことによって、 R_t と R_r/R_t を対照木より大きくしていたと理解できる。このように生残木の R_r が回復していなかったのは、移植時期が10月上旬で常緑樹には不適な時期（上原, 1966）であったために根量の回復が抑制されたためと考えられる。

6月（移植259日目）には、生残木では R_t と R_r/R_t がともに増加し、 BP は低下した。一方、対照木の R_t 、 R_r/R_t および BP にはそれほど大きな変化はなく、4月14日（移植185日目）の測定値とほぼ同程度の値を示した。7月（移植287日目）には対照木では R_t と R_r/R_t に急激な増加が生じ、生残木の R_r/R_t は対照木とは逆に低下した（図4 (a), (b)）。6月に生残木の R_t が増加した要因としては降水量の少なさ（平年の36%）（日本気象協会福岡本部, 1994）による土壌の乾燥があげられる。土壌が乾燥すると土壌中の気相部分が増し、加えて土壌と根の収縮が生じることから根の表面と土壌粒子との接触が失われ、根からの吸水が阻害される（Kramer and Boyer, 1995）。このため、移植によって根量が十分に回復せず、土壌の浅い部分に根が集中した生残木において R_t と R_r/R_t の顕著な増加が生じたと考えられる。対照木については、移植による根量の減少は生じていないため、生残木のような土壌の乾燥の影響が大きくは生じなかったと考えられる。この時点では、 BP は対照木と同程度の低下にとどまっていた（図4 (c)）が、7月になるとさらに土壌の乾燥が進行し、対照木の BP は -0.44MPa となり、このときの生残木の BP は -1.0MPa まで低下して、 R_r/R_t は0.32まで小さくなった（図4 (b), (c)）。玉泉ら（1994）はヒノキ苗の BP に対する R_r/R_t の変化について、 BP が -0.5MPa 以下では R_r/R_t は直線的に

小さくなると報告している。植物の木部では、土壌の水分状態が好適な場合においても蒸散量が多い日中にはキャピテーションが起きて通水機能が失われること (Kramer and Boyer, 1995) から、7月の24日間の無降水で (日本気象協会福岡本部, 1994) 土壌が極度に乾燥し、生残木の地上部においてもキャピテーションが発生し、その結果として Rr/Rt が小さくなったと考えられる。

このように、 Rt と BP に移植直後と比べてかなりの回復が観察されても、 Rr あるいは Rr/Rt が十分に回復していない場合には、移植木の健全度は高いとは言えない。したがって、移植木の健全性の指標としては Rt や BP だけではなく、 Rr あるいは Rr/Rt を知ることが重要である。これらの指標のうち、 Rt と Rr の算定には水ポテンシャルと F もしくは蒸散速度を測定する必要があるが、 BP と Rr/Rt については水ポテンシャルのみの測定で算定が可能であることから、より利用価値の高い指標として位置付けることができる。

4.3. おわりに

本研究の結果より、Bagged-Shoot法を用いて樹体地際部の Ψ_{stem} を測定し、同一個体の Rr/Rt を継続的に推定することから、移植直後の根の通水機能の低下と活着過程での回復を確認することができた。すなわち、 BP のような樹体の水分状態だけではなく Rr/Rt の変化についてもモニターすることによって、移植木の健全度がより正しく評価できることが示唆された。今後は移植木の樹種とサイズ、移植の時期、根回し・枝おろしなどの技術的手法や、本研究では言及できなかった灌水の量と期間による土壌水分のコントロールなどの実際の移植を想定した試験を行った上で、 Rr/Rt の変化をモニターする必要がある。

引用文献

- BAR-TAL A., BAR-YOSEF B. and KAFKAFI U. (1990) : Pepper transplant response to root volume and nutrition in the nursery. *Agron. J. Environ.* 82 : 989-995
- BATES R. M. and NIEMIARA A. X. (1996) : Effect of transplanting on shoot water potential of bare root Washington hawthorn and Norway maple trees. *J. Environ. Hort.* 14 (1) : 1-4
- COUTTS M. P. (1980) : Control of water loss by actively growing Sitka spruce seedlings after transplanting. *J. Exp. Bot.* 31 : 1857-1597
- COUTTS M. P. (1981) : Effect of root or shoot exposure before planting on the water relations, growth, and survival of Sitka spruce. *Can. J. For. Res.* 11 : 703-709
- COWAN I. R. (1965) : Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.* 2 : 221-239
- FITTER A. H. (1987) : An architectural approach to the comparative ecology of plant root system. *New Phytol.* 89 : 61-77
- FITTER A. H. and Hay R. K. M. (1981) : Environmental physiology of plants. Academic Press, New York, p. 181 (太田安定ら 共訳)
- 玉泉幸一郎・須崎民雄 (1983) : 土壌水分環境が植物群落の分布におよぼす影響について (IV) - 斜面位置による水分状態の比較 - . *日林九支研論集* 36 : 81-82
- 玉泉幸一郎・作田耕太郎・齋藤 明 (1994) : 乾燥にともなうヒノキ苗の通水抵抗の変化. 第105回日本

林学会大会講演要旨集：766

- HARRIS J. R. and BASSUK N. L. (1995) : Effect of drought and phenological stage at transplanting on root hydraulic conductivity, growth indices, and photosynthesis of Turkish hazelnut. *J. Environ. Hort.* 13 (1) : 11-14
- 池田武文・須崎民雄・村上能崇 (1988) : 移植後の樹木木部の水分通導性的変化と木部の解剖学的観察. *日林誌* 70 (9) : 395-402
- 苜住 昇 (1979) : 樹木根系図説. 誠文堂新光社, 東京, 1121pp.
- KJELGREN R. and CLEVELAND B. (1995) : Growth and water relations of Kentucky coffee tree and Silver maple following transplanting. *J. Environ. Hort.* 12 (2) : 96-99
- KRAMER P. J. and BOYER J. S. (1995) : Water relations of plants and soils. Academic Press, New York, 495pp.
- KRAMER P. J. and KOZLOWSKI T. T. (1979) : Physiology of woody plants. Academic Press, New York, 811pp.
- 小林達明・大熊利和・沖津二郎・窪田順平 (1993) : スギの水ポテンシャル変化と通水抵抗の配置. *日林論* 104 : 525-526
- LANDSBERG J. J. (1986) : Physiological ecology of forest production (Applied botany and crop science). Academic Press, New York, 198pp.
- MOHR H. and SCHOPFER P. (1969) : Pflanzenphysiologie. Springer-Verlag, Berlin, p. 462 (網野真一・駒嶺 穆 監訳)
- NEAU T. S. and INRA R. H. (1987) : The use of root suckers to estimate root water potential. *Plant Cell Environ.* 14 : 585-591
- 財団法人日本気象協会福岡本部 (1994) : 福岡県気象月報. 平成6年5-7月
- 沖津二郎・甲斐秀彦・小林達明・瀧澤英紀・中桐秀晴・竹内真一・田中隆文・吉川 賢 (1994) : ヒノキ・タムシバの木部圧ポテンシャルの日変化と通水抵抗の比較. *日林論* 105 : 459-460
- PHILIP J. R. (1966) : Plant water relations, Some physical aspects. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 17 : 245-268
- ROOK D. A. (1972) : Conditioning Radiata pine seedlings to transplanting, by restricted watering. *N. Z. J. For. Sci.* 3 (1) : 54-69
- SHOLANDER P. F., HAMMEL H. T., BRADSTREET E.D. and HEMMINGSEN E. A. (1965) : Sap pressure in vascular plant. *Science* 148 : 339-346
- 高橋邦秀 (1981) : トドマツ, アカエゾマツ苗木の耐乾性に関する研究. *林試研報* 313 : 111-160
- 瀧澤英紀・窪田順平・小林達明・塚本良則 (1996) : スギ樹体の蒸散による水貯留変動に関する実験的研究. *日林誌* 78 (1) : 66-73
- TURNER N. C. (1981) : Correction of flow resistances of plants measured from covered and exposed leaves. *Plant Physiol.* 148 : 339-346
- 上原敬二 (1966) : 樹木の移植と根廻. 加島書店, 東京, 253pp.

(1998年12月4日受付; 1999年3月10日受理)

Summary

Changes in the hydraulic resistance were compared among *Chamecyparis obtusa*, *Pinus thunbergii* and *Persea thunbergii* transplanted trees. The hydraulic resistance per unit leaf area (R_t), proportion of root hydraulic resistance to total resistance (R_r/R_t) and predawn leaf xylem pressure potential (BP) of transplanted trees with 390 cm³ (SRB; small root ball) and 25000 cm³ (LRB; large root ball) root balls volume were observed from just before transplanting until two weeks after.

The R_t , R_r/R_t , and BP of control trees did not show remarkable changes throughout measurement. Eight days after transplanting, the R_t of SRB treated *Chamecyparis* had reached 250 times as large as control tree, and transpiration ceased. The R_r/R_t increased to 0.97, two weeks after. Under LRB treated *Chamecyparis*, the cessation of transpiration was not recognized. The R_t increased to 70 times as large as control, and R_r/R_t was 0.93, two weeks after. The BP of SRB and LRB treated *Chamecyparis*, gradually declined to -2.0 MPa and -0.8 MPa, respectively. Under the *Pinus* and *Persea* transplanted trees, the R_t increased to 30-120 times as large as control trees, and the R_r/R_t were over 0.9 just after transplanting. Furthermore, Tr ceased within one week after transplanting in both of the root treatments. The BP in transplanted trees declined immediately, similar to the R_t trends. The LRB treated *Chamaecyparis* tree survived until next spring, but the R_t and R_r/R_t did not return to the levels under control tree.

With this, increment of root hydraulic resistance was considered a major reason for the rapid increase of hydraulic resistance in transplanted trees. There were also different trends in the changes in hydraulic resistance, depending on the root ball volume and tree species. Species specific characteristics, like the root branching structure, root volume regulation in root ball, may account for the difference.

Key words : transplanting, hydraulic resistance, root mass, xylem pressure potential, Bagged-Shoot method