樹液流動計測に基づいた樹木の移植後の生育評価 —移植後4年間のタイサンボク (*Magnolia grandiflora* L.) の事例—

竹内真一^{*1)}・高橋理一¹⁾・飯田真一²⁾

1) 南九州大学環境園芸学部 Faculty of Environmental Horticulture, Minami Kyushu University

2) 国立研究開発法人森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute

摘要: 樹木の移植後の生育評価を検討した長期の樹液流動の測定結果は非常に少ない。本研究では常緑樹種であるタイサンボクの移植個体を対象に、ヒートパルス速度を4カ年に渡ってヒートレシオ法により連続測定した。ヒートパルス速度から推定される樹液流動は、経年的に順調に増加し、3年目から適用したグラニエ法の樹液流速の測定結果からも流れの増加は支持された。また、樹幹内の流速分布は時間経過とともに外側が内側の流れを卓越する結果が3年に渡り得られた。実測した移植直前の個体葉面積と移植後4年目の落葉葉面積がほぼ等しいことから、葉量は増大した。さらに、土壌断面調査により顕著な根系伸長が観察され、地下部の拡大が確認された。経年的な樹液流動の増加と樹幹内の流速分布の変化は計測個体の拡大と調和しており、移植後の正常生育を判定するツールとして樹液流動の計測が有効であることが明らかとなった。

キーワード: 移植, 樹液流動, タイサンボク, ヒートパルス速度, 樹液流速

TAKEUCHI, Shinichi, TAKAHASHI, Riichi and IIDA, Shinichi : **Growth diagnosis of a transplanted tree based on sap flow measurement : A case study of *Magnolia grandiflora* L. for four years after transplantation.**

Abstract: We measured heat pulse velocity in the trunk of *Magnolia grandiflora* L. for four years after transplantation. Sap movement estimated by the heat pulse method increased over time. This finding was supported by measurement of sap flux using Granier method. Focusing on the velocity distribution in the trunk, the increasing trend in outer sap flow after the transplantation was far greater than that in inner sap flow. Leaf area of the canopy just before the transplantation and dropped leaf area after four years was almost the same volume, clearly indicating the expansion of total leaf area. We also observed the obvious root expansion with soil surveying methods. Measured increase of the sap flow are consistent with tree growth. This confirms that sap flow measurement is a valuable tool for the growth diagnosis of a transplanted tree.

Key words: tree transplantation, sap flow movement, *Magnolia grandiflora*, heat pulse velocity, sap flux

1. はじめに

根系切断や強剪定をとまなう樹木の移植作業は、樹木の蒸散および光合成活動に影響を及ぼし、一時的に樹木の成長を阻害する。適度な根系切断と強剪定の量的バランスを知るために、蒸散活動を反映する幹部の樹液流動は重要な生体情報として利用可能であると推定される。樹体内の水分移動を直接測定し、植物個体の蒸散量を求める方法である樹液流動測定法は、これまで比較的ユーザーが限られていたが、グラニエ法プローブの自作⁹⁾やヒートレシオ法(HR法)¹⁾の汎用計測器の普及などの要因により、急速に適用事例が蓄積されつつある。前者は長さ2 cmのプローブ周囲における樹液流の平均値が検出され、樹幹の放射方向に複数設置することにより、深度別の測定結果が報告されている¹²⁾。後者は長さ3.5 cmのプローブに1.5 cm間隔で検出点が配置されており、低流速が検出でき、かつ局所的な樹液流が同時に検出される。樹幹内の樹液流速分布は枝葉部や根系の切断行為と密接に関わ

っていることが報告されており¹⁰⁾、樹木の移植作業はこれらの切断行為と連動するため、移植後の活着判断のための樹液流動測定も深さ別に実施する必要がある。しかしながら、樹木移植に関連した深度別樹液流動測定結果の報告は少なく、かつ、移植後の活着を検討した比較的長期の樹液流動の測定結果も見当たらない。

竹内ら¹¹⁾は、樹木移植後の活着診断を樹液流動の結果から行う試みとして、タイサンボク(*Magnolia grandiflora* L.)の移植後の樹幹部の樹液流動をHR法により2カ年に渡って測定した。その結果、移植後から樹液流動は経年的に上昇し、順調に活着していると判断された。さらに、樹幹内の樹液流動は時間経過とともに外側が内側よりも卓越する傾向が示され、成長が制限されていた根系が定植後に拡大して吸水範囲が拡大している可能性がある。しかし、移植後の樹体の成長量は未計測であり、樹液流動の増大傾向が定植後の順調な生育状態を反映したものであるかどうかは不明であった。

そこで本研究では、先行研究¹¹⁾と同一のタイサンボクの調

* 連絡先著者 (Corresponding author) : 〒885-0035 宮崎県都城市立野町 3764 番地 1 E-mail : stakeuch@nankyudai.ac.jp

査個体を対象として、定植後3年目と4年目のヒートパルス速度の計測を継続し、成長にともなう樹液流動の増加が検出されるか否かを合計4年間のデータで検討した。また、グラニエ法による樹液流速測定を移植後3年目以降に実施し、ヒートパルス法による検出結果の妥当性を評価した。さらに、移植後の樹体成長量を定量的に明らかにするために、調査個体の葉量および根系成長量を実測した。

2. 方法

2.1 調査個体

移植木の樹液流測定は、南九州大学都城キャンパス樹木園に生育している常緑広葉樹のタイサンボクを対象とした。タイサンボクは移植困難木として知られているが、庭園の主木や公園の緑陰樹として利用されており、自然木の場合は20 mまで成長する。

本研究のタイサンボクの調査個体は、2011年11月18日に現在の場所に植え付けられ、その時の樹高は6.4 m、胸高周囲長52 cm、地際周囲長97 cmであった。2011年3月に根回し工を行った際に葉量が6割程度となるように樹冠が削減されており、その後は移植時も含め剪定は行われていない。本個体は通常5月に古葉が落葉し、その後新葉が展葉して葉量が増加する。

本研究の目的は、定植後の調査個体の順調な生育状態を樹液流動の変化に基づいて評価することであるが、調査期間中に水ストレスによる蒸散活動への影響が生じると、その評価に影響する可能性が高い。そこで、水ストレスが発生しないように、以下のタイミングで灌水を実施した。すなわち、移植後の水鉢への頻繁灌水は2012年5月8日まで行われ、その後移植後2年目の2013年は根鉢外側にU字型に延長6.6 m、幅30 cm、深さ15 cmの溝を掘削し、1,000 Lを7月23日と31日、8月19日の計3回灌水した。3年目は7月22日と25日に300 Lの補助灌水を計2回行った。4年目は5月21日と8月7日に900 Lの灌水を2回行った。2015年12月の樹体サイズは樹高6.7 m、胸高周囲長57 cm、地際周囲長98 cmであり、枝張りは280~320 cmであった。

2.2 樹液流測定

樹液流動の測定にはHR法(SFM-1: ICT Ltd)を用いた。速度検出点は、幹の表面から10.5 mmと25.5 mmの2深度で、測定間隔は30分とした。移植作業後の2011年11月28日からヒートパルス速度を長期連続測定している¹¹⁾。同一のセンサーを長期間適用すると、樹幹の肥大成長にともなう、センサーが樹幹の内側に埋没することが想定される。本測定に用いたHR法のプローブは幹表面側に幅1.5 cmのプラスチック製の保護部があり、これがプローブの埋没を防ぐ構造になっているため、埋没が生じにくい特徴を有する。また、HR法は温度検出点の不具合や測器の故障等により、年1回程度のプローブの差し替えを行っており、その度に速度検出点が幹の表面から10.5 mmと25.5 mm深さとなるよう

に調整している。また、2013年8月19日には、幹東側の部位においてHR法を増設し、樹幹半径方向のヒートパルス速度の分布(速度比)⁷⁾を求めた。

同一樹幹を対象に測定原理の異なる複数の樹液流測定を適用し、その計測結果を比較することで、測定結果の信頼性を高めることが可能となる。そこで、HR法に加えて、グラニエ法(熱消散法)を同一個体に適用し、樹液流速を測定した。2014年10月に、直径2 mm、長さ2 cmのヒータープローブとリファレンスプローブ⁴⁾を15 cm間隔で調査個体の北側110 cm高さの部位、東側160 cm高さの部位、西側170 cm高さの部位に設置し、シリコンで防水加工を施し、アルミ製のカバーとシルバーマルチで遮光した。プローブ間の温度差は、データロガー(CR800, Campbell Scientific Inc.)を用いて10秒間隔で計測し、10分の平均値を自記録した。なお、孤立木に対してグラニエ法を適用した場合、午前中に不自然な樹液流速のピーク(モーニングピーク)が現れる場合がある⁹⁾。本研究では、モーニングピークが現れた時間帯は欠測として取り扱った。

2.3 ET₀の算定と4年間の気象特性

実験サイトから1.8 kmの都城地区のアメダスデータ⁵⁾からCROPWAT³⁾を用いて基準作物蒸発散量(ET₀)(mm/d)を算出した。7月から3カ月間の平均ET₀値は、2012年から2015年まで、それぞれ3.9, 4.7, 3.6, 3.6 mm/dであり、2013年の蒸発要求量が高く、2014年と2015年は比較的蒸発要求量が低い年であった。

2012年(6月から9月の総降雨量は2097 mm)と2014年(2066 mm)と2015年(2202 mm)は豊水年で、2013年(846 mm)は渇水年であった。

以上のように、降水量と蒸発要求量の傾向から、2013年は樹体が水ストレスを受けやすい気象条件であった。

2.4 根系調査と葉面積調査

移植後の樹体成長量を調査するため、根系調査と葉面積調査を行った。根系調査日は、2012年7月20日と2015年10月2日の2回である。樹幹から3.25 m地点から内側に向かって1.5 m深さの調査溝を設け、タイサンボクの根系が確認されるまで動力噴霧機による水流を用いて土壌を剥離し、根の伸長量を調査した。

移植直前の葉面積を型あて法に基づいて2011年8月31日に実測した。ここで採用した型あて法は、基準となる葉面積の型紙を6種類準備し、実葉を型紙に照合し6段階に区分して、全葉面積を算出する方法である。移植後、櫓(底辺2.62 m×2.69 m、高さ3.7 m)を調査個体周辺に設置し、個体の外側にネットを張り、2015年5月以降の全落葉を収集し、葉面積を計測した。

3. 測定結果と考察

3.1 樹液流動の経年変化

移植後2年間の樹液流動の季節変化¹¹⁾と同様に、その後

図-1 移植後のヒートパルス速度の変化
日積算ヒートパルス速度の年平均値を示す。

Fig.1 Change of heat pulse velocity of *Magnolia grandiflora*
Data are shown as annual mean velocity, daily basis.

図-2 移植後のヒートパルス速度の変化
日積算ヒートパルス速度の年最大値を示す。

Fig.2 Change of heat pulse velocity of *Magnolia grandiflora*
Data are shown as maximum velocity, daily basis.

図-3 移植後のヒートパルス速度/ET₀の年変化

Fig.3 Change of the ratio of heat pulse velocity to ET₀

の2年間も30分間隔のヒートパルス速度と最高・最低気温、ET₀の季節変化傾向は良く一致している。詳しいデータはここでは示さないが、10.5 mm深さの測定結果について以下に記述する。

移植後3年目の2014年では、1年目の最大値(7月22日)である12.5 cm/hは5月31日に、2年目の最大値である16.0 cm/h(8月10日)は7月7日に記録され、各々1カ月以上早い速度上昇傾向を示した。3年目の30分間隔のヒートパルス速度の最大値は7月24日に計測された19.2 cm/hであり、同年の最高気温も同日の35.9℃であった。全般的に蒸発要求量の少ない夏季の気象条件であったにもかかわらず、ヒートパルス速度は最大値で前年より3.5 cm/h上回った。

移植後4年目の2015年では、5月17日から樹液流動が上昇し、ヒートパルス速度の最大値は8月1日に計測された23.6 cm/hであり、前年より4.1 cm/h上回っていた。同年の最高気温は同日の36.4℃であった。

図-1に移植後の日積算ヒートパルス速度の年平均値を示す。10.5 mm深さの検出点においては、移植後1年目の平均速度27.8 cm/dに対し、2013年から2015年までそれぞれ1.90倍、2.21倍、2.79倍に増加した。25.5 mm深さの検出点においては、移植後1年目の年平均値43.8 cm/dに対し、2013年から2015年までそれぞれ1.13倍、1.10倍、1.18倍と微増した。

このように、ヒートパルス速度から推定されるタイサンボクの樹液流動は年を経るほどに増大しており、移植後に目視で観察および確認された樹体の正常な生育状況と矛盾しない。一方、10.5 mm深さの検出点の平均値の年増加割合は4年間で1.90倍、1.16倍、1.26倍と始めの1年の伸びに対して、その後の2年間の増加割合が鈍化している。これは、2013年の7月から3カ月間の平均ET₀値が4.7 mm/dと、他の年に比べて約1.0 mm/dほど高いため、ET₀値の年による差異がヒートパルス速度の測定値に影響したと考えられる。

図-2に移植後の日積算ヒートパルス速度の年最大値の変化を示す。10.5 mm深さの検出点においては、移植後1年目の最高速度100.9 cm/dに対し、2013年から2015年までそれぞれ1.5倍、1.9倍、2.2倍に増加した。一方、最大値の年増加割合は4年間で1.46倍、1.30倍、1.17倍となり、図-1の増加割合に比べて平滑化されている。これは年最大値が出現した測定日のET₀値が2012年から2015年までそれぞれ5.6、6.2、6.1、6.3 mm/dとほぼ同等の値であったことに起因する。なお、年最大値は、2014年は灌水から数日以内に生じ、それ以外の3カ年は50 mm以上の降水から数日以内に生じており、いずれも根群に十分な水分が供給されている状態であった。これらの年最高値は高い蒸散要求と根系への十分な水分供給という二つの条件が満たされているときに生じていることから、年最高値はその時点において、本調査個体が有する潜在的な通導性を示していると考えられる。一方、25.5 mm深さの検出点においては、移植後1年目の最高速度110.3 cm/dに対し、2013年から2015年までそれぞれ1.06倍、1.22倍、1.36倍に増加し、10.5 mm深さの最大値と明確な線形関係が認められた($r^2=0.96$)。

図-1の年平均値は経年的な気象条件の年々差の影響を受

けることから、ヒートパルス速度の年積算値を ET_0 の年積算値で基準化⁷⁾し、図-3に示す。10.5 mm 深さの検出点における基準化数値の年増加割合は、4年間で1.72倍、1.28倍、1.32倍となり、図-1の年平均値の変化割合に比べ、2013年の乾燥傾向が平準化されている。一方、樹幹内側の25.5 mm 深さの検出点における基準化数値の年増加割合は、4年間で1.02倍、1.08倍、1.12倍となり、図-1と比較して後2年間に樹液流動が微増していることが示されている。図-3の基準化数値は、葉面積の増加や蒸散活性の上昇、根系の発達など、経年的な通水性の変化の大まかな傾向を示すものであり、移植後の樹体の正常生育を評価する指標になりうると判断される。

図1から図3の値は、土壌の水分状態にも影響を受けるため、灌水処理の影響を検証する。灌水日を含む灌水後の5日間のヒートパルス速度を解析対象から除外し、図中の数値との差を算出した結果、図-1では2013年から2015年まで、それぞれ0.8 cm/d、-2.2 cm/d、-2.3 cm/d、1.6 cm/dとなり、4%以内に留まった。同様に図-3では、図中の数値との差を算出した結果、2013年から2015年まで、それぞれ0.6 cm/mm、-0.2 cm/mm、-0.3 cm/mm、0.2 cm/mmとなり、5%以内に留まった。図-2の年最大値のうち2014年については、灌水2日後に年最大値192 cm/dが記録されたが、灌水の5日前にも184 cm/dという極めて高い値が計測されており、灌水による大きな差異は確認されていない。以上のことから、灌水処理の基準化数値への影響は無視できるレベルであると判断した。

3.2 樹幹外側と内側の樹液流動傾向

図-4に4年間の樹幹内の速度比の経時変化を示す。日積算速度が10 cm/d以下の流れが小さい場合はプロットを除外している。移植後の時間経過とともに、樹幹内側の流れに対する外側の流れは相対的に増加し、移植後2年目の4月15日に速度比は1.0に達した。その後、速度比が1.5を上回ったのは、3年目の7月29日であり、4年を経過して速度比は1.8近くまで上昇した。なお、これまでの計測結果から灌水後に内側の流れが微増するとともに、通水断面積が変化していることが示されている¹¹⁾。

図-5に2013年8月19日における樹幹半径方向のヒートパルス速度分布の測定結果を示す。測定部位における幹内の最大樹液流動を示す場所は樹皮から15.5 mm 深さの位置にあった。最大値を計測した15.5 mm 深さを基準とし、この部位の値が1となるように、同時間の樹液流動の深度分布を相対的に評価した値を図に示している。図-4において、移植後に10.5 mm 深さと25.5 mm 深さの速度比が逆転した後の測定結果であり、図-5においても10.5 mm 深さの速度が25.5 mm 深さの速度を上回っていることが示されている。

ここで、樹液流動の幹横断面上の相対的な速度分布(図-5)に基づいて、樹幹の肥大成長と樹液流速の検出点との関係について検討する。調査木の胸高直径は対象期間である4年間

図-4 移植後の樹幹内のヒートパルス速度比の変化

Fig.4 Change of ratio of the heat pulse velocity in the trunk

図-5 樹幹内のヒートパルス速度分布 (2013年8月19日)

Fig.5 Radial distribution of heat pulse velocity in the trunk

Data were taken on 19th August, 2013.

で、16.55 cm から18.14 cm まで増大し、これが樹液流動の測定部位の直径とほぼ同じと仮定すると、幹半径で8 mm の増加があったことになる。本研究で用いたHR法プローブ外側の検出点である10.5 mm 深度における速度比は0.82と推定される(図-5)。他方、プローブの絶対的位置が変化せず、幹半径で5 mm の成長が生じると、プローブは5 mm 内側に埋没し、プローブは最大値を示す15.5 mm 深度に到達する。つまり、プローブが埋没してしまう状況下では、5 mm に相当する樹幹の半径方向の成長(=5 mm のプローブの埋没)が継続する間、樹液流動の増加が計測されることになる。しかし、本研究で利用したプローブは埋没が生じない構造であり、プローブの埋没が生じていないことを計測期間中に目視で確認していることから、検出点への肥大成長の影響は無いものと考えられる。

3.3 グラニエ法による樹液流速の経年変化

図-6はHR法によるヒートパルス速度の日積算値とグラニエ法による樹液流速の日積算値を比較したものである。なお、両方法が比較できる10月16日から11月30日の値を示している。また、グラニエ法による樹液流速は3箇所の測定点のうち、東側の値を図示している。グラニエ法による樹液流速の最大値は2014年が $30.7 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であったのに対して、2015年は $39.6 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ と30%ほど値が高くなっている。HR法も2014年が15.7 cm/hであったのに対して、2015年が17.3 cm/hと10%ほど高くなっている。図-6から、ヒート

図-6 ヒートパルス速度と樹液流速の比較

Fig.6 Comparison between heat pulse velocity by HR method and sap flux measured by Granier method

パルス速度と樹液流速の間に高い相関があること、そして、2014年よりも2015年において図中のより右上側に多くのデータがプロットされており、HR法とグラニエ法の双方の値が同時に大きくなっている。なお、グラニエ法による他の2箇所の計測データについても、程度の違いはあるものの、2015年の樹液流速が2014年よりも大きくなっていることを確認している。グラニエ法の検出範囲は幹表面から2 cm深度であり、最大の樹液流動を示す15.5 mm深度を内包している。さらに、2 cm以深では相対的な樹液流動が大きく低下することから、グラニエ法が計測した増加は樹液流動の増加によるものと考えるのが妥当である。HR法とグラニエ法が検出した樹液流動の増加傾向の程度(図-6の年最大値がグラニエ法で $139 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ から $185 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, HR法で65 cm/dから82 cm/dに増加)に差異が存在する理由の一つは、樹幹横断面上の樹液流速の分布特性、特に測定方位による樹液流速の違いであると考えられる¹²⁾。また、一般にヒートパルス速度は樹液流速と高い相関を有しているが²⁾、ヒートパルス速度と樹液流速の関係は線形ではない場合もある⁸⁾。現状ではヒートパルス法とグラニエ法が検出した増加傾向の差異の原因を特定することは不可能であるが、測定原理の異なる両手法がともに樹液流動の増加傾向を検出したことは、両測定結果の信頼性を高めるとともに、以下のことを強く示唆している。すなわち、図-1から図-3で示したHR法により測定した2深度のヒートパルス速度が移植後4年間にわたって連続的に増加した計測事実と、図-6で示した同一樹幹の他の部位でグラニエ法により測定した樹液流速が2年間にわたって増加した計測事実は、両手法ともに、タイサンボクの樹液流動が経年的に増大していることを明確に示している。

3.4 移植後の根系と葉面積の増加

本研究では根鉢の半径を75 cmとして移植を行ったが、移植直後の2012年7月に行った根系調査では、根系の水平範囲は幹から半径103 cmまで28 cm拡大した。一方、2015年10月では、幹から半径165 cm地点の土壌断面(写真-1)に

写真-1 移植後4年間で伸張した根系(2015年10月)

Photo 1 Root survey after four years (Oct. 2015)

において、水平方向に70 cm長さの根が確認され、直径8 mm以上の最長根は83 cmであった。すなわち、根系の水平範囲は幹から最低でも235 cmに達し、3年間で最低でも132 cm拡大していたことになる。

調査期間中の葉面積の増加について、実測値が得られている移植前の樹体付着葉量と移植4年後の落葉量との比較で検討する。移植前の2011年8月に計測した同一個体の総葉面積は 8.76 m^2 であったのに対して、2015年5月から12月まで採取し続けた落葉の総面積は 8.98 m^2 であった。つまり、2011年当時の個体の総葉面積よりも2015年の落葉量が 0.22 m^2 上回っていた。タイサンボクは常緑樹であり、樹冠内の古葉が選択的に落葉するが、樹冠には常に多くの葉が存在している。なお、落葉そのものは自然に発生したものであり、枝に付いている葉の人為的なサンプリングは行っていないことから、冬季においても多くの葉を常緑性のタイサンボクは有している。したがって、移植前の総葉量を移植後4年経過後の落葉量が上回る計測事実は、移植後の4年間で個体の総葉量が増加したことを明瞭に示している。また、2011年11月から2015年12月の約4年間の間に、樹高は30 cm、胸高周囲長は5 cm増加している。以上のことから、地上部および地下部ともに調査個体は拡大しており、移植後の順調な生育が確認された。

前項で示したヒートパルス速度から推定されるタイサンボクの樹液流動は年を経るほどに増大しており、実際に観測された葉量の増大や根系の発達と非常によく一致している。さらに図-3の結果から、灌水処理が一時的な樹液流の増大を引き起こさなかったことを確認しており、伸張した根群が十分な吸水量を継続して発生させていたものと判断される。蒸散量の増大は辺材部の通導断面積が大きく変化しないならば樹液流速の増大を引き起こす⁴⁾。移植木である本調査個体は剪定や根鉢作成により発達した樹冠と根系を損失したが、樹幹辺材部の通導性は移植前の機能を維持していたと考えられる。そして、4年間で半径8 mm程度の通導面積の増加だけでは考えにくい樹液流動の増加、すなわち蒸散量の増大につながった。したがって、肥大成長よりも一時的に損失した葉

量と根系の回復に光合成産物が配分されたと考えるべきであろう。また、前報¹¹⁾において提示した内側の流れより外側の流れが卓越する計測結果は、移植後3年目と4年目も継続的に確認された。この流速分布が根系の成長にともなう吸水範囲の拡大や樹冠部の拡大と関連性があるかどうかを当該調査木において根系切断や摘葉実験などの実施により精査することで、樹液流動計測による移植後の樹体の部位別正常生育に関する詳細情報が得ることができるようになる。

4. まとめ

樹体の活着・生育状況を診断するツールとしての樹液流動計測の有効性を検討することを目的として、タイサンボクを対象として移植後4年間の樹液流動を実測するとともに、根系と葉量の変化を調査した。その結果、ヒートパルス速度から推定されるタイサンボクの樹液流動は経年的に順調に増加し、3年目から適用したグラニエ法の樹液流速の測定結果からも流れの増加は支持された。このことは、タイサンボクの葉量の増加にともなう蒸散活性の増大を正確に検出した結果であると判断される。さらに、時間の経過とともに樹幹内の外側の樹液流動が内側を卓越する結果が得られた。この計測事実は実際の根系の拡大との関連性が示唆される。なお、本研究では、移植時の作業工程に付随する一時的な根系と葉の減少が回復してゆく過程に着目しており、その回復状況が樹液流動計測によって正確に検出可能であることが明らかとなった。したがって、移植後の活着ならびに正常生育を判断するために、樹液流動計測は極めて有効な手段であると結論される。今後、より多くの樹種を対象として移植前後の樹液流動や樹体のサイズに関わるデータを蓄積することにより、移植後の活着状況を判定する指標としての樹液流動計測の有効性を確認したいと考えている。このような取り組みが進むことによって、最終的には樹木移植時の枯死リスク指標の確立が可能になるものと期待される。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 JP26450945 の助成を受けたものです。また、南九州大学環境園芸学部緑地生態工学研究室の皆様、特に関将志氏、松田藍氏、吉村諭二氏、ならびに同技能職員の篠崎圭太郎氏、松島大樹氏のご協力に感謝いたします。

引用文献

1) Burgess, S. S. O., Adams, M.A., and Bleby, T.M. (2000)

- Measurement of sap flow in roots of woody plants : a commentary. *Tree Physiology*, 20: 909-913.
- 2) Burgess, S. S., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A., and Bleby, T. M. (2001) An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21: 589-598.
- 3) FAO CROPWAT ver8.0, http://www.fao.org/nr/water/infoceres_databases_cropwat.html (参照: 2016年2月10日)
- 4) Iida, S., Shimizu, T., Tamai, K., Kabeya, N., Shimizu, A., Ito, A., Ohnuki, Y., Chann, S. and Keth, N. (2016) Interrelationships among dry season leaf fall, leaf flush, and transpiration: insights from sap flux measurements in a tropical dry deciduous forest. *Ecophysiology*, 9, 472-486.
- 5) 気象庁. “過去の気象データ検索”. 気象庁ホームページ. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照: 2013年1月10日)
- 6) 熊谷朝臣 (2007) 森林水文学. 森林水文学編集委員会編, 森林の水のゆくえを科学する, 森北出版, pp. 114-119.
- 7) 桑田孝・小竹利明・竹内真一・Maximov, T.C.・吉川賢(2002) : 東シベリア北方林域における *Larix gmelinii* 林の水分動態と土壌水分, 飽差との関係. 日本林学会誌, 84(4) : 246-254.
- 8) 小南裕志・鈴木雅一 (1990) : ヒートパルス法による実蒸散量の推定. 京都大学農学部演習林報告, 62, 197-207.
- 9) Lu, P., Urban, L., and Zhao, P. (2004) Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, 46: 631-646.
- 10) Nadezhdina, N., David, T.S., Davis, J.S., Nadezhdin, V. and Pinto, C.A. (2013) Mapping the water pathways in stem xylem by sap flow measurements during blanch severing experiments. *Acta Horticulture*, 991: 223-230.
- 11) 竹内真一・松田藍・西由貴恵 (2014) : 移植後2年間のタイサンボク (*Magnolia grandiflora* L.) とシダレモミジ (*Acer palmatum* Thunb.) の樹液流動特性. 日本緑化学会誌, 40(1) : 60-65.
- 12) Shinohara, Y., Turuta, K., Ogura, A., Noto, F., Komatsu, H., Otuki, K. and Maruyama, T. (2013) Azimuthal and radial variations in sap flux density and effects on stand-scale transpiration estimates in a Japanese cedar forest. *Tree Physiology*, 33: 550-558.

(2016年7月20日受理)