

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 30 日現在

機関番号：37601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450495

研究課題名(和文)大型樹木の樹体内の水分移動特性を決定する要因とは？

研究課題名(英文)What factor determine the characteristic of sap flow movement in the tree trunk?

研究代表者

竹内 真一 (Takeuchi, Shinichi)

南九州大学・公立大学の部局等・准教授(移行)

研究者番号：30268817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：大型の樹木の移植を行う際に、枝の切断や根系の損傷を伴う作業が必要となる。造園の技術者らは現場での経験知に基づいて、どの樹種が移植時に枯死する危険性が高い移植困難木であるか、枯死を回避するためにどの程度の大きさの根鉢を作成すべきかを感覚的に理解している。この経験知を樹液流速という科学的データに基づいて明らかにすることを目的として、本研究では適切な移植作業に有益な樹液流のデータセットを作成した。また、国内で広く普及している樹液流測定法のグラニエ法を基準として、普及度が低いHeat Ratio (HR) 法およびHeat Field Deformation (HFD) 法の測定精度を年スケールで確認した。

研究成果の概要(英文)：In case of tree transplanting for large tree, it is forced to cut the tree canopy and derogate the root systems. Gardeners understand empirically which wood species is sensitive to the transplantation work and which size of root ball is suitable to avoid severe damage for tree body. In this study, we collect useful sap flow data for tree transplantation work, accurate measurement of sap flow movement before and after root preparation and transplanting allows us to predict transplant success or failure. Thermal dissipation method has been widely used in Japan and there are quite a few numbers of studies measuring sap flow in large tree in a forest by heat ratio method and heat field deformation method. These three methods were applied for a mature tree of Japanese cedar and stem segments connected with vacuum pump to generate artificial sap flow to conduct calibration work.

研究分野：造園・緑化学

キーワード：樹木移植 樹液流 HR法 タイサンボク シダレモミジ スギ

### 1. 研究開始当初の背景

根系が樹冠に比して長大に成長している大型樹木を移植することは、根鉢作成のために樹体の水分供給を担う重要根を切断し、大幅な樹液流速の低下を引き起こし、樹体内の水分バランスが崩れ、樹体の枯死に繋がりがかねないダメージを軽減することにその成否が委ねられている。移植困難木や大型樹木の移植には、事前の根回し工事が必要であり樹冠部では強剪定が行われ、根系では環状剥皮が施術される。光合成活動に重要な葉量を大きく損失する強剪定は、その後の新たな発根を制限することになり、適度な根系切断と強剪定の量的バランスを保つためにその中間に位置する幹部の樹液流速を把握することは重要な生体情報として欠かせない。根回し工事を伴う移植に関する事例は多く報告されているが、これら一連の技術に関する樹体内のメカニズムに特に重要な役割を果たしている樹液流動についての知見は必ずしも十分ではない状況にあった。言い換えれば、樹木の移植や剪定の現場において、樹体内の水が流動しているとの認識について技術者は理解しているものの、どの程度の流れを確保すればその作業内容が移植の成功につながるかについての研究事例が少ないということである。

樹液流のリーディング科学者として知られる N.Ndezdera は自然木の枝の切断や根系の切断が樹幹内速度分布に大きな影響を及ぼすことから、樹幹内の樹液流速分布を精査することの重要性を提示した。また、同じく J.Cermak は自然木の樹木根の吸水特性が樹幹内速度分布に及ぼす影響を精査した結果、樹幹近傍の根の吸水は幹内内側の流れに大きく影響を与え、根群域全面からの吸水が樹幹外側の流れに大きく影響を与えることを見出している。これらの知見は、大型樹木の移植の際に樹幹内の樹液流速分布を把握しながら作業を進めることにより、移植工事の成否について判断することの意義は大きいことを示唆している。

これまでユーザーの限られていた樹体内の水分移動を直接測定する樹液流測定法(Sap flow Measurement)は、ヒートレシオ法(Heat Ratio, 以下 HR 法)の汎用機の普及により、急速に樹液流の測定結果の蓄積が可能となっている。さらに樹幹の放射方向に詳細な速度分布が把握できる最新の樹液流測定法である Heat Field Deformation (HFD) 法の汎用機の登場により、飛躍的に樹体内の流速分布に関する情報が得ることが期待される。

### 2. 研究の目的

まず、本研究の先行研究として実施された内容を紹介する。移植困難木であるタイサンボクを対象に HR 法を適用し、剪定作業や根回しといった前処理から開始される樹木の移植作業に伴う樹体内の水移動特性の変化

を把握することを目的とした移植実験を行った。この測定により、ヒートパルス従来法では根回し後や移植後の低流速樹液流動を把握することは困難であったが、HR 法は僅少な流れが検出可能で、根回しに伴う強剪定作業・掘り取り・環状剥皮などの根回し工前後の樹液流動ならびに移植後の樹液流動が把握可能であった。このタイサンボクの調査個体は2カ年に渡って測定が続けられ、移植後の活着状況について検討が加えられた。その結果、7月下旬に最大値を示す樹液流動の変化の形状が移植後の活着の判断情報として採用できることが明らかとなった。さらに樹幹内の速度分布は時間経過とともに外側が内側の流れを卓越する測定結果が得られた。この測定結果は、樹木の移植作業に伴い、根鉢に縮減された根群が定植後に拡大していくことで吸水範囲が拡大することにより得られたと考えられ、前述の J.Cermak et al. による研究成果と類似していた。根回し・強剪定を伴う樹木の移植作業は、長期的には自然木に比べて樹冠の下位部から上位部へと展葉し、主要根群域も中央部から外縁部へと変化することから、一連の研究成果は“樹体内の水分移動分布を精査することにより、移植作業に伴う根系切断・その後の根群発達・樹木活着に関する情報が土壌を掘り返さずに得られる”という可能性を示すものと判断され、このようなデータの蓄積と自然木の樹幹内の速度分布の測定結果との比較検討が喫緊の課題となっている。

このような背景により、本研究では移植木と自然木を対象に最新の HFD 法や HR 法を国内の大型樹木に適用し、測定精度の検定を汎用型測定法のグラニエ法と比較により行う。実際に根回しや剪定の強度を変化させながら、樹液流速分布の変化を明らかにする。同時に樹液流速の長期測定を移植木と自然木を対象に行う。大型樹木を移植作業に寄与できる必要な樹液流の情報はどのようなものであるかを検討し、適切な移植方法を確立する。ことを目的として研究を遂行するものである。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的に対応して、下記の方法により研究を実施した。

樹液流測定の精度の検定について

樹木の移植作業を応用し、樹体へのダメージを極力抑えるように工夫して根系を掘り出して根鉢を作成し、大型の電子天秤上で単木蒸散量を実測する“根鉢秤量法”を提案し、シダレモミジとカラタネオガタマ、スギ、ヒノキを対象に、主に HR 法とグラニエ法の検定を行った。さらに、根鉢秤量法との比較を行うために、根鉢吊木法、切木法、強制通水法を適用した。

根回しや剪定作業の樹液流動への影響と樹液流の長期測定

定植後4年間のタイサンボクの樹液流動を

調査し、移植時に消失した樹冠と根系の回復に伴う樹液流動の増加が検出されるか否かを検討した。さらにシダレモミジとカラタネオガタマを対象に移植作業前後の樹液流動を比較検討した。さらに筑波森林水文試験地の樹齢 60 年を越えるスギを対象としてグラニ工法、HR 法、HFD 法を適用し、通年測定を行った。

移植作業に寄与できる樹液流の情報

移植後の樹体の正常生育を評価する指標になりうると樹液流のデータ解析手法について検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 概要

本研究の成果は次の 2 点に集約される。一つ目は、最も立木に近い状態で精度良く蒸散量を計測する手法であり、かつ、樹液流計測のキャリブレーション方法として有効な根鉢秤量法を提案し、非破壊キャリブレーション方法としての妥当性を検証した点。もう一つは、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、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点である。どちらも事例研究ではあるものの、その手法がそれぞれの目的に有効であり、この 2 点を樹液流に関する国際シンポジウム(10<sup>th</sup> International Workshop on sap Flow)において成果発表したところ、高い評価を得た。

##### (2) 根鉢秤量法

樹液流計測のキャリブレーション法として、現在多く適用されているのが切木法であり、強制通水法である。これらの手法は高精度に樹幹内を流れる水の量を把握することが可能であるが、樹幹を完全に切断することが必要であり、検定後も健全な状態で対象木を維持したい場合には適用不可能であるという欠点を有している。さらに、樹幹の切断に伴い、樹体内の水分張力が変化することも、課題としてあげられる。このような欠点を補い、最も立木に近い状態で精度良く蒸散量を計測する手法であり、かつ、樹液流計測のキャリブレーション方法として有効な根鉢秤

量法を提案した。この方法は、樹木の移植工事に行われる造園学的プロセスから着想を得たものである。すなわち、まず対象個体の根系を重機により慎重に掘り出した後、根系へのダメージを極力抑えるように動力噴霧機による水流を用いて丁寧に土壌を剝離し、根巻きを行って根鉢を作成する。その後、大型の電子天秤上にて、根鉢からの蒸発を抑制させた状態で根鉢の重量を秤量し、その重量変化量から蒸散量を求める方法である。(写真-1) まずは、シダレモミジに適用し、2 年に渡り根鉢秤量法によるキャリブレーションを行った結果を取りまとめた。シダレモミジは葉量の多さに比して樹高が相対的に低いことから、根鉢を含む対象個体の総重量を抑えることが可能であるため、根鉢秤量法の適用に適している。

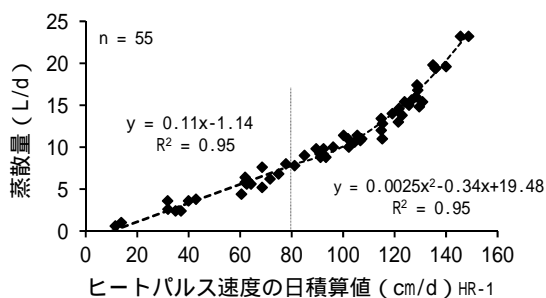


図-1 根鉢秤量法による蒸散量とヒートパルス速度の関係(シダレモミジ、根鉢総重量約 1200kg、直径 1.64 m、厚さ 65 cm)

図-1 には、風によるノイズを除去するために、日スケールの HR 法により測定したヒートパルス速度の積算値と根鉢秤量法による蒸散量の関係を示す。両者の間には非常に高い正の相関があることが分かる。ヒートパルス速度の日積算値が 80 cm/d までの領域では蒸散量との間には線形に近い関係が見られるが、より値が大きくなるとヒートパルス速度の増加率が蒸散量のそれよりも小さくなった。これは既往の研究成果と合致するものであり、HR 法を用いて樹液流計測を行う場合には、特に樹液流が大きい領域でヒートパルス速度と蒸散量の間関係性が変化することを示している。そこで、本調査個体における HR 法のキャリブレーション式は、図-1 におけるヒートパルス速度の日積算値が 80 cm/d 未満の低流速の場合に 1 次式、同じく 80 cm/d 以上の高流速の場合に 2 次式を併用することとした。2 年に渡って測定した結果のうち、初年度は 1 次式の領域のみで、2 年目は 1・2 次式の領域に跨ってプロットされている。このキャリブレーション式に基づいて、樹液流量(キャリブレーションを経てヒートパルス速度から算出される蒸散量)を算定し、両年の  $ET_0$ (基準作物蒸発散量)と比較した結果、両者の包絡直線式の傾きは経年で 2.06 から 2.75 に増加した。両年ともに全落葉量から葉面積を測定した結果、2.52  $m^2$  から 7.31  $m^2$  へと 2.9 倍に増加していた。このように、樹液流量の増加は葉面積の増加と



写真-1 根鉢秤量法(測定状況)

一致しており、調査個体は2年間で明瞭に樹体を生長させた。通常の約4倍の重量で根鉢を作成した結果、損傷を免れた根系が水分を継続的に吸収し、比較的活発な光合成活動が維持されたものと推察され、根鉢作成から2カ年で蒸散量や葉量の大きな増加に繋がったものと考えられる。このように、根鉢秤量法の適用時には、根系に与える損傷を可能な限り少なくするように注意深く根鉢を作成することで、その後の調査個体の順調な生育を期待することができ、かつ調査個体を破壊することなく高精度な樹液流速測定法のキャリブレーションを行うことが可能であると結論された。

### (3) 移植作業が樹液流動へ及ぼす影響評価

先行研究として、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を提示した。しかしながら、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、同一のタイサンボクの調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年目に降に実施し、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。

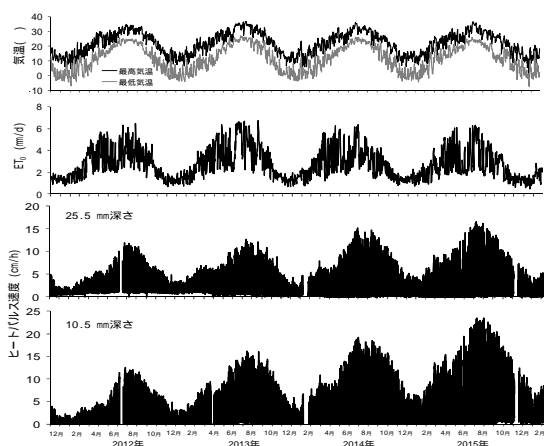


図-2 移植後のタイサンボクのヒートパルス速度の変化と最高・最低気温の測定結果とET<sub>0</sub>の算定結果

図-2は移植後の幹部における4年間のヒートパルス速度の変化と最高・最低気温、ET<sub>0</sub>との算定結果である。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かった。日積算ヒートパルス速度の年最大値の変化は、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。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た。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( $r^2=0.96$ )。

さらに、ヒートパルス速度の年積算値をET<sub>0</sub>の年積算値で基準化して検討した結果、10.5 mm深さの検出点における数値の年増加割合は、4年間で1.72倍、1.28倍、1.32倍となった。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、後2年間に樹液流動が微増していることが示された。この基準化数値は、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た。また、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。

そこで、根系と葉面積の拡大について精査した。本研究では根鉢の半径を75 cmとして移植を行ったが、根系の水平範囲は幹から最低でも235 cmに達し、移植後4年間で160 cm拡大していたことが確認された。また、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した結果、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<sup>2</sup>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<sup>2</sup>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<sup>2</sup>上回っていた。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た。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。図-2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た。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とい

う研究成果をもとに考察した結果、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た。そして、4年間で半径8mm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、樹幹内側の流れより外側の流れが卓越する先行研究の計測結果は、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と結論付けられた。

#### (4) 樹液流の長期測定

国内で広く普及している樹液流測定法のグラニエ法を基準として、普及度が低いHR法およびHFD法の測定精度を年スケールで確認するために、筑波森林水文試験地のスギを対象としてグラニエ法を1年間適用した結果、センサーの設置から26~140日間が経過すると測定値が過小評価される場合があることが明らかとなった。他方、スギについて適用例が少ないHR法ならびにHFD法について同様の検討を行ったところ、設置から半年以上が経過すると計測値が過小評価される傾向が認められた。この傾向はグラニエ法で見られたものと同様であると考えられた。なお、過小評価はすべてのセンサーで生じるわけではなく、どのセンサーでいつ起きるのかを推測することは困難である。いずれの場合もスギは衰退せずに健全な状態を保っていることから、実際の樹体内の水の流れは不足せずに生じているものと考えられる。したがって、センサー設置部を迂回するように樹液流が偏在している可能性が示唆される。過小評価が生じない状況において、スギ樹液流の放射方向の分布特性をグラニエ法およびHFD法で比較した結果、両者は良好な整合性を示した。HFD法は8深度の樹液流を検出することが可能であるため、放射方向の分布特性の評価が主目的の場合、その利用価値は高いと評価された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

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. 日本緑化工学会誌, 40(1): 60-65. 査読有

飯田真一・竹内真一(2015): 樹体内の水移動の実測に基づく樹木移植時リスク指標の確立: 水文学と園芸学の学際共同研究. 日本水文科学会誌, 45(3): 89-97

竹内真一・高橋理一・飯田真一(2016): 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-. 日本緑化工学会誌, 42(1): 110-115

竹内真一・高橋理一・飯田真一(2017): 根鉢秤量法に基づくヒートレシオ法による樹液流計測のキャリブレーション - シダレモミジ(*Acer palmatum* Thunb.)を対象にして-. 日本緑化工学会誌, 査読中

〔学会発表〕(計9件)

Shin'ichi Iida, Shin'ichi Takeuchi, Takanori Shimizu, Koji Tamai (2015): Application of three sap flow techniques for Japanese cedar: attempting to estimate the characteristics of sap movement. Japan Geoscience Union Meeting, ACG30-P05.

竹内真一, 北平祐樹, 下田穂絵(2015): コナラの萌芽更新株の樹液流測定. 第46回日本緑化工学会大会研究発表会要旨集, p1.

竹内真一, 杉尾良隆, 飯田真一(2015): ヒートレシオ法, グラニエ法, HFD法によるシダレモミジの樹液流測定と根鉢秤量法によるキャリブレーション. 第46回日本緑化工学会大会研究発表会要旨集, p2.

北平祐樹, 高橋理一, 篠崎圭太郎, 松島大樹, 竹内真一, 飯田真一(2015): カラタネオガタマの樹液流動特性. 平成27年度日本造園学会九州支部研究・事例報告集 p49-50.

小南祐志, 吉村謙一, 飯田真一, 竹内真一(2016): HRM (Heat Ratio Method) 法を用いた樹液流速測定. 原理および測定システムの構築. 第127回日本森林学会大会学術講演集, S6-5, p81.

竹内真一, 飯田真一(2016): 様々な樹木の樹液流計測と根鉢秤量法によるキャリブレーション. 第127回日本森林学会大会学術講演集, S6-6, p81.

飯田真一, 清水貴範, 野口正二, 荒木誠, 澤野真治, 玉井幸治(2016): グラニエ法によるスギの樹液流速測定とその問題点. 第127回日本森林学会大会学術講演集, S6-1, p81.

Shin'ichi Iida, Shin'ichi Takeuchi, Takanori Shimizu, Koji Tamai (2016): Sap flow measurement for Japanese cedar throughout the year with three techniques and related problem. Japan Geoscience Union Meeting, ACG22-P01.

竹内真一, 西山太久郎, 森本真央(2016): ラクウショウは冠水条件下で樹液流を増す? 第47回日本緑化工学会大会研究発表会要旨集, p23.

〔その他〕  
ホームページ等

竹内真一

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内真一 (TAKEUCHI Shinichi)

南九州大学・環境園芸学部・准教授

研究者番号：30268817

(2) 研究分担者

飯田真一 (Iida Shinichi)

国立研究開発法人森林総合研究所

森林防災研究領域・主任研究員

研究者番号：70375434