

ヒートパルス法による実蒸散量の推定

小南 裕志・鈴木 雅一

Measurement of the actual transpiration rate in a tree
of *Chamaecyparis obtusa* by a heat pulse method

Yuuji KOMINAMI, Masakazu SUZUKI

要 旨

ヒートパルス法による単木蒸散量の測定方法を確立するために、桐生試験地内の樹高14mのヒノキを用いてヒートパルス速度と吸水量を並行して測定し、樹幹断面通過水量と吸水量の関係を比較した。その結果、地際から152cmと448cmの2高度でのヒートパルス速度から求めた断面通過水量と、吸水量は10%程度の誤差範囲内で一致した。断面通過水量の推定は次の方法で得られる。①不均一場の熱移流拡散の数値解析によって求められる、ヒートパルス速度-樹液流速の関係と、樹液流速の樹幹深度方向の速度分布。②同一高度に6本のセンサーを設置して求められる、樹液流速の樹幹円周方向の速度分布。

1. はじめに

森林からの蒸散量を推定するためにヒートパルス法を用い、単木吸水量との関係を比較した。

ヒートパルス法は樹幹にヒーターと、その上下に温度センサーを挿入して、ヒーターによって与えた熱を上下に設置したセンサーによって測定して、上下のセンサーの位置の温度差の変化からその位置の樹液流速を測定するものである。ヒートパルス法は樹液流速を計測するものであるために、間接的な蒸散量の測定法であるが、林木の生育する環境をほとんど乱さずに、自然条件下で連続的な測定が可能であるという長所を持っている。

ヒートパルス法によって単木の蒸散量を推定するためには、測定されたヒートパルス速度を蒸散速度を相対的に示す指標として用い、この値と微気象要素、測定木の胸高直径、樹高、等との関係を求め、そこから蒸散量の推定を行う[Balek and Pavlik(1977)¹⁾、奥村武信ら(1989)²⁾]か、あるいはヒートパルス速度を補正して断面通過水量の推定を行い直接蒸散量の測定を行うかどうかであるが、後者の方法における検討課題として以下の3点が挙げられる。

a) ヒートパルス速度と樹液流速の関係

通常ヒートパルス速度は、点源で与えられた熱が等方的に理想化された場で、一軸方向の移流拡散で移動すると仮定した、Closs(1958)³⁾の式で求められている。これに対し、ヒーターと温度センサーの挿入による(センサー径の幅で起きる)通水阻害によって、Clossの式による値が過小評価となるとの指摘がSwanson and Whitefield(1981)⁴⁾によりなされた。そこで樹液流速と比例関係で対応するヒートパルス速度を求めるためには、Clossの式による値にSwansonらの指摘する補正を加える必要がある。また、ヒートパルス速度と樹液流速の比例係数を調べねばならない。

b) 測定樹幹断面における樹液流速の速度分布

ヒートパルス速度を測定する樹幹断面を通過する水量は、樹液流速と通水断面積の積であるが、この積算をするとき断面内の樹皮からの深さ方向の速度分布と通水断面積を決定しなければならない。さらに、樹幹の円周方向にも樹液流速が均一であるかどうか調べる必要がある。

c) 断面通過水量と蒸散量の関係

樹幹表面からの蒸発はほとんどないと考えられるため、ヒートパルス法による測定断面の通過水量と蒸散量の総量は一致するとみられるが、日変化についてのタイムラグが存在する可能性がある。この点についての検証が必要である。

ここでは、これらの課題について、Swansonらにならった不均一場の熱移流拡散の数値解析と、立木吸水量とヒートパルス速度の同時測定を行うことによって、検討を加える。

2. 実験方法

2-1 調査地と測定木

測定は滋賀県琵琶湖南東部にある桐生試験地内のヒノキで行われた。測定木の樹高は14.08m 地際直径は15.22cm 樹冠投影面積は5.9m²であり、生枝下高は6mで、それ以下に枝・葉はなかった。測定測定木の概要を図1に示す。

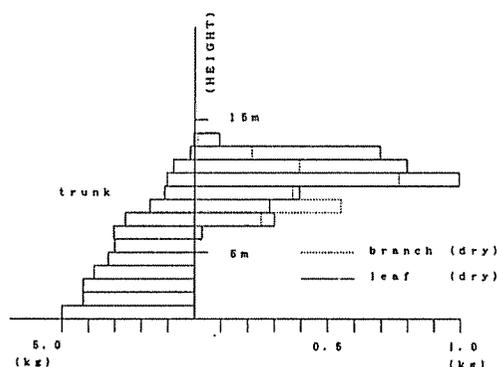


図-1 測定木の概要

Fig. 1 The state of experimented tree.

測定木周辺の林分はヒノキアカマツ混交林で樹冠は閉鎖されており、樹冠をアカマツによって形成され、その下部にヒノキが存在する2段林になっている。しかし、測定木については樹冠上には直接マツの樹冠はなく、樹幹上部は開いていた。

2-2 測定項目と測定方法

樹幹を通過する実水量とヒートパルス速度の関係をj知るために、樹高14mのヒノキ測定木を地際で切断し、これを鉄製のポールで組み上げた高さ4mのやぐらに固定し、測定木の切断面を水の入ったポットに漬け、その吸水量を測定した。同時に、地上152cmと448cmの高さで、それぞれ円周方向に等角度で6つ

のヒートパルスセンサーを設置しヒートパルス速度を測定した。ヒートパルス法測定は測定木の切断以前から行われており、また吸水量の測定は切断後4日間行われた。

ヒートパルス法測定

ヒートパルスセンサーは地際から152cmと448cmの高さに円周6方向に等角度で設置した。用いたセンサーおよびヒーターの端子の直径は2.0mm、ヒーターの上下の温度センサーの設置位置はヒーターから上方向に1.0cm、下方向に0.7cmである。設置時期は152cmのセンサーが9月4日、448cmが9月9日である。センサーは樹皮から1.2~1.5cmの範囲で4回程度、深さを変化させた測定を行い、およそヒートパルス速度が最大になるようなところに設置し、その後、センサーの設置深さの変更は行わなかった。

測定を行った12本のセンサーによるヒートパルス速度はAD変換機（ESD製, Green Kit-77）とハンドヘルドコンピューター（Epson製, HC-20）によって自動記録された。測定インターバルは5:00~20:00が20分程度, それ以外の夜間は1時間程度である。また測定秒数が600秒を越えた場合は樹液流は極めて小さいものとして測定を打ち切った。

吸水量測定

測定木を地際で切断し, これを鉄パイプで組んだやぐらに固定して切断面を水の入ったポットに漬け, このポットの重量の減少分を電子天秤（A&D製, FW-15）で測定し, 測定木の吸水量とした。

吸水量の測定は1989年9月26日から行われた。午前5時45分から切断が行われ, 6時15分に切断完了, 6時20分から水切りを行い吸水量の測定は7時10分から行われた。このため吸水量のデータが存在するのはそれ以降である。その後, 吸水量の測定は9月30日の11時30分まで行われた。

天候は9月28日が雨でその他の日は晴れであった。

2-3 測定結果

(a) ヒートパルス法および吸水量測定結果

ヒートパルス法および吸水量の測定結果を図2に示す。従来のClossの式によるヒートパルス速度は切断後も切断前とほぼ同じ日変化が測定されている。吸水量のデータで9月28日はマイナスの値が計測されているがこれは降雨中のStem flowが吸水量測定をしているポットに流入するのを防ぐことができなかったためであり, この間のデータは考察時には使用しないこととした。

Clossの式によるヒートパルス速度と吸水量の日変化は晴天日のピークの位置が同じであり, 降雨時に両者ともに小さい値を示す。というように全般的には良好な対応を示している。

図3に, 9月26日から9月29日までの各センサーによるClossの式によるヒートパルス速度と吸水量の関係を, 縦軸にヒートパルス速度, 横軸に吸水量をとって示す。

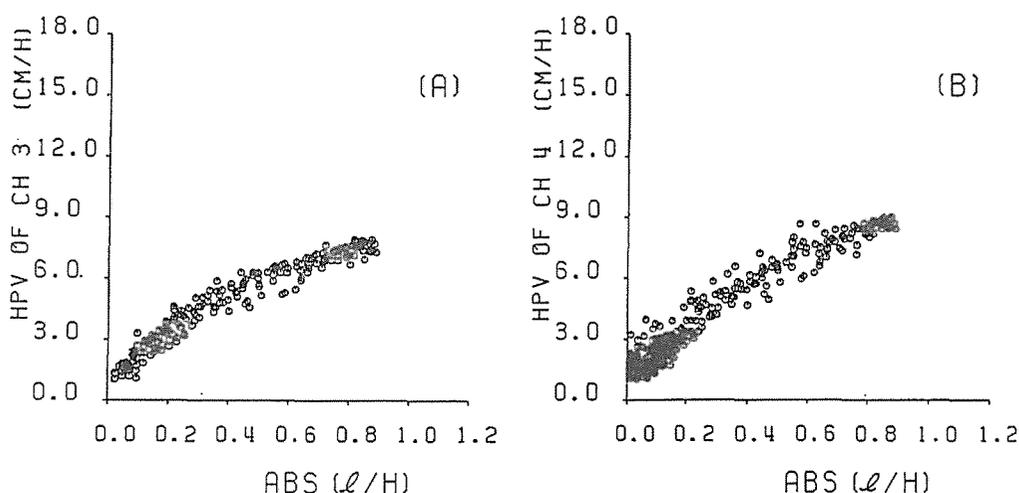


図-3 ヒートパルス速度と吸水量の関係

Fig. 3 Relationships between heat pulse velocity and amount of water absorption
(A) 152cm CH3 (B) 448cm CH4

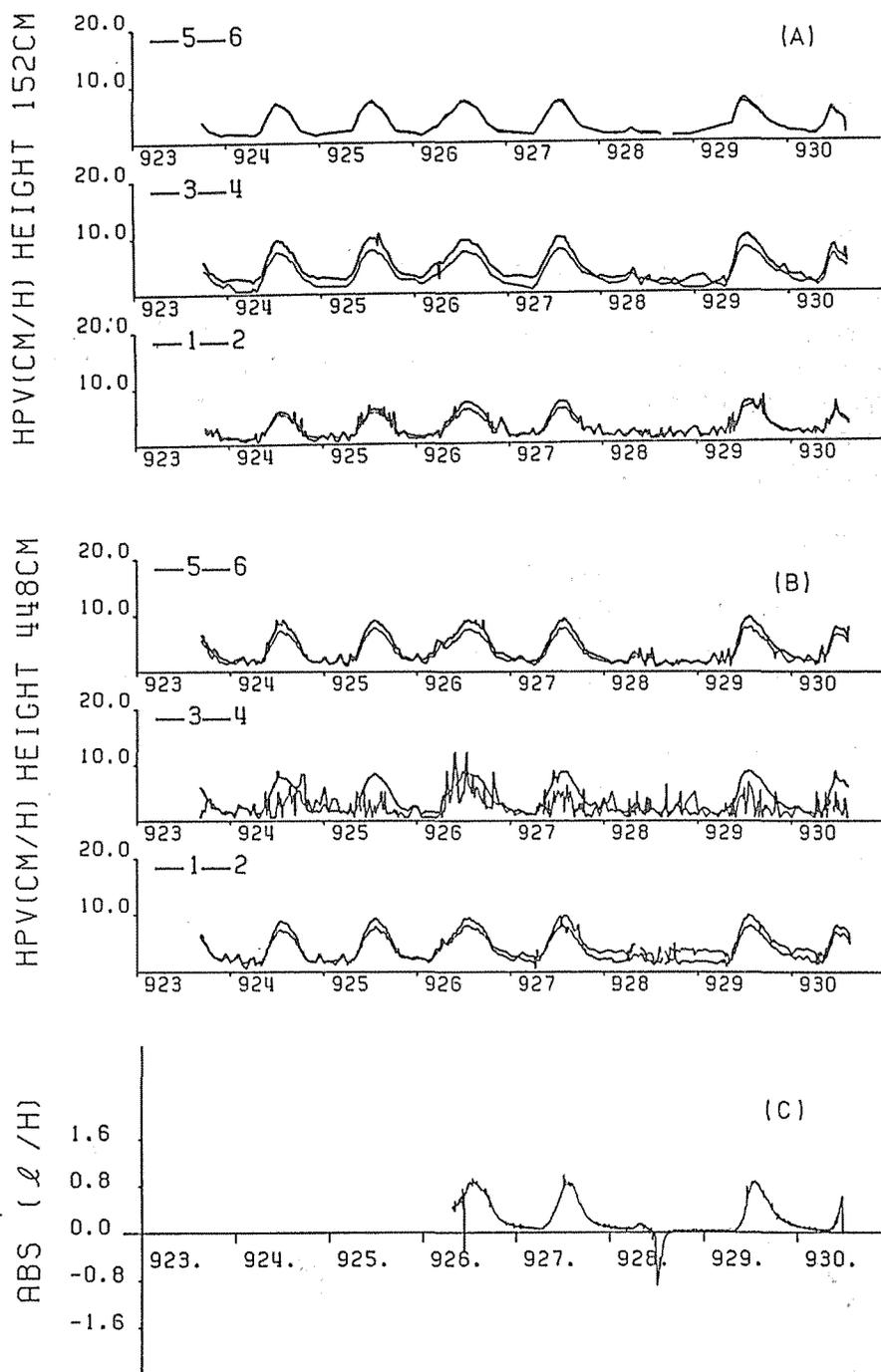


図-2 ヒートパルス法および吸水量測定の結果

Fig. 2 Heat pulse velocity and the amount of water absorption

- (A) Heat pulse velocity at 152cm CH1~CH6
- (B) Heat pulse velocity at 448cm CH1~CH6
- (C) Water absorption

これを見ると両者の関係は上に凸の曲線で比例関係ではなく、従来の報告と同様に樹液流速が速くなるに従ってClossの式によるヒートパルス速度は過小に評価される傾向があることがわかる。

3. Swansonらの方法によるヒートパルス速度と樹液流速の関係の考察

3-1 Clossによるヒートパルス速度の解析解

2次元の場合における、樹液流による熱移流と拡散による熱移動の双方を考慮にいたしたヒートパルスの熱移動方程式は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K_x}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{K_y}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{K_z}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - a u \frac{\rho_s c_s}{\rho c} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{Q}{\rho c} \quad (1)$$

x軸:鉛直方向(樹幹の上方向を正), y軸:樹幹の接線方向, T:温度, K_x, K_y : x, y方向の熱拡散速度, ρ_s, c_s :木部の密度および比熱, ρ, c :木部とsap(樹液)を合わせた部分の密度および比熱である。ここで、樹液流動はx方向にのみ存在する。右辺第4項はヒーターの存在する場所で、加熱中のみ正の値をとり、ほかは0である。

y方向に均一な条件を与え、Clossは次の解析解を示し、ヒートパルス速度を求める(4)式を得た。

加熱点の下流側(樹幹の上側) xの地点の温度変化は、

$$T(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi K t}} \exp \left[-\frac{(x - vt)^2}{4 K t} \right] \quad (2)$$

加熱点の上流側(樹幹の下側) x'の地点の温度変化は、

$$T(x', t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi K t}} \exp \left[-\frac{(-x' - vt)^2}{4 K t} \right] \quad (3)$$

ここで、vはヒートパルス速度 $[a u (\rho_s c_s / \rho c)]$ である。

ヒートパルスを与えた後、時刻 t_0 で x, x' の温度が等しくなったとすると、(2), (3) 式より、

$$v = \frac{(x - x')}{2 t_0} \quad (4)$$

となる。通常ヒートパルス法の測定では、 t_0 を測定し、(4)式でヒートパルス速度 v を求める。

ここで、u, a u, v はいずれも樹液流速に関係するが、u は流動部分を流れる速度、a u は木部を含む単位断面積あたりの速度、v はヒートパルスの伝播速度でそれぞれ異なる。ここで流

動断面積をかけて断面通過水量になる樹液流速は

au に対応する。 au と v の比は $\rho c / \rho_s c_s$ であり, Marshall(1958)⁹⁾によると,

$$\frac{\rho c}{\rho_s c_s} = \rho_b (C_w + m) \quad (5)$$

ρ_b : 木部密度 (乾重/体積), C_w : 材の比熱, m : moisture fraction (湿重-乾重)/乾重, の関係があり, さらに Dunlap(1912)¹⁰⁾は C_w がわずかに温度に依存している事を示している。

$$C_w = 0.266 + 0.000166 T \quad (6)$$

ここで, T の単位は $^{\circ}\text{C}$ 。ここから, u , au , v は比例関係が成り立つと考えられる。

3-2 SwansonらによるClossの式のヒートパルス速度の補正方法

(4) 式は y 方向に均一な場を前提にしているが, 実際の測定条件ではヒーターと温度センサーの挿入による (センサー径の幅で起きる) 通水阻害の影響が無視し得ない。このため Swansonらは y 方向で幅 w の $u=0$ の部分を設け (1) 式を直接差分法で計算し, 温度センサー設置位置の温度変化を用いた (4) 式によるヒートパルス速度 v_c と計算条件で与えたヒートパルス速度 v_a を比較した。この関係が既知ならば, (4) 式による値から通水阻害の影響を受ける以前のヒートパルス速度を求める事ができる。そこで Swansonらの用いた方法をわれわれの測定条件に適用して数値計算を行った。与えた条件は, センサーおよびヒーター端子の直径を 2.0mm, 端子設置に伴う樹液流阻害幅を 2.1mm, センサー設置位置をヒーターから上方向に 1.0cm, 下方向に 0.7cm とし, ρ , c , ρ_b , m , K_x , K_y に Swansonらと同様の数値をいれて求めた ($\rho = 0.3$, $c = 3.18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \text{ deg}^{-1}$, $\rho_b = 0.3$, $m = 2.20$, $K_x = 0.0038 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-1}$, $K_y = 0.0076 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ S}^{-1} \text{ deg}^{-1}$, $\Delta x = \Delta y = 0.4 \text{ mm}$, で 150×150 の格子範囲について (1) 式を Rosenberg(1969)¹¹⁾ の ADI 法を用いて差分化を行った)。

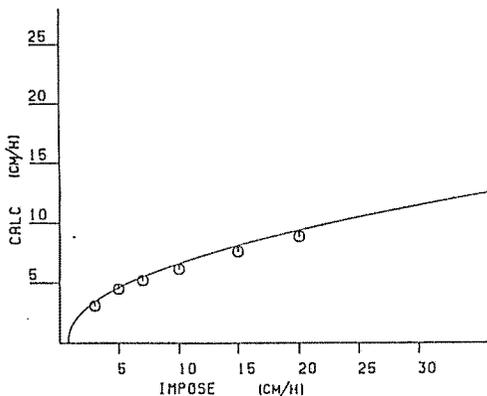


図-4 数値計算結果

Fig. 4 Result of numerical analysis

X-AXIS sap flow velocity

Y-AXIS heat pluse velocity by Closs equation

3-3 数値計算結果

数値計算による結果を図 4 に示す。Clossの式で求められたヒートパルス速度 (v_c) と樹液流速 (au) の関係は樹液流阻害直径 2.1mm の時, au に 3.0~20.0cm/h の値を与えた結果から 2 次式で近似すると

$$au = 0.260 v_c^2 - 0.131 v_c + 0.782 \quad (7)$$

となった。(au , v_c の単位: cm/h)

4. ヒートパルス法による実蒸散量推定法の検討

4-1 樹液流速の推定

数値計算によって求めた(7)式は、吸水量が0になる時に樹液流速 au も0となるように測定値から帰納的に求めた式を用いて修正し

$$au = 0.260v_c^2 - 0.131v_c + 0.782 \quad (v_c \geq 3.12) \quad (8)$$

$$au = 1.386v_c - 1.321 \quad (0.927 \leq v_c < 3.12) \quad (9)$$

$$au = 0 \quad (v_c < 0.927) \quad (10)$$

とした(図5)。

(8)～(10)式を用いて推定した樹液流速と吸水量の関係を図6に示す。これを見ると両者の直線性はかなり高く、(8)～(10)式で算出したヒートパルス速度と樹液流速間には比例関係が成立する。

ここで(9)式に定数項が存在するのは、上下の温度センサーが等温になった時を判断する測定上の問題からである。つまりヒートパルス速度が小さくなるにしたがって上下のセンサーの温度差はAD変換機の測定最小値付近で長時間推移するために、一度でも等温であると判断した時点でヒートパルス速度を算定してしまうと、求められた速度は実際の樹液流速に比べて過大に評価されるためである。

このため(7)式が適用できない流速の遅い区間について(9)(10)式の間接関係を経験則として導入した。

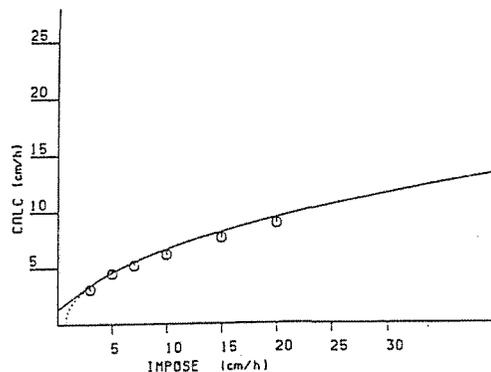


図-5 ヒートパルス速度から樹液流速を求める補正関数

Fig. 5 The function to estimate sapflow velocity

X-AXIS sap flow velocity

X-AXIS heat pluse velocity by Closs equation

4-2 ヒートパルス速度の日変化の測定高によるタイムラグ

この問題を各高度のセンサー間の関係を見ることによって考察する。図7に9月23日から9月29日までの各センサー間の関係を縦軸横軸にそれぞれの高さでの6本のセンサーの平均推定樹液流速をとって、午前と午後のデータの記号を変えて示した。これを見ると午前と午後のデータを区別しなくても十分に原点を通る直線で近似可能であり、樹液流の日変化の時間遅れは、20分程度のインターバルでの測定では認められない。

4-3 樹幹深度方向の樹液流の速度分布

ヒノキにおいては樹液流は辺材部のみを流れている。一般にヒートパルス法測定において、一定深度に固定したセンサーによって測定されるヒートパルス速度と測定深度を変化させて測定したヒートパルス速度の比によってヒートパルス速度の深さ方向の速度分布測定を行うと1.2～1.5 cmの深さにピークが見られ、また測定深さが心材部に至ってもヒートパルスの移動が測定され

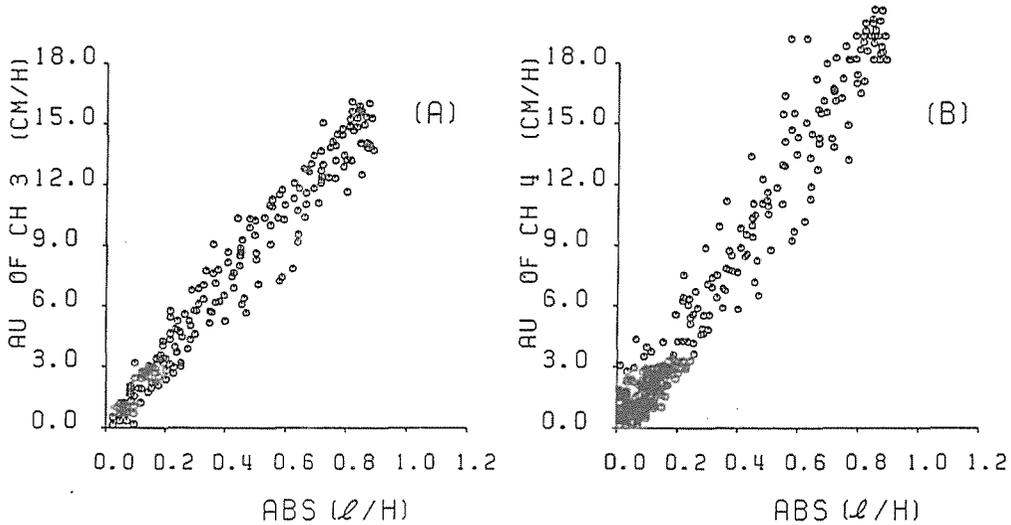


図-6 推定樹液流速と吸水量の関係

Fig. 6 Relationships between the estimated sapflow velocity and the amount of water absorption

(A) 152cm CH3 (B) 448cm CH4

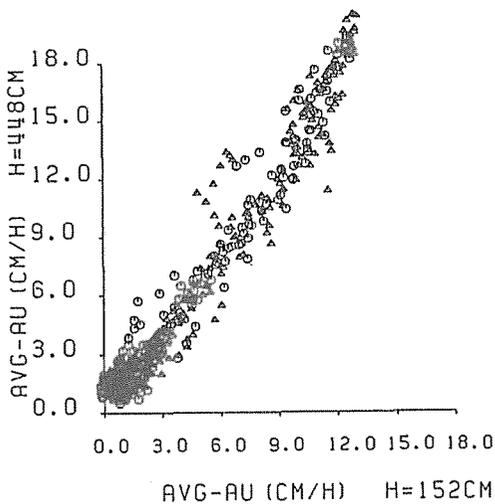


図-7 高さ 152 cm と 448 cm での樹液流速の関係

Fig. 7 Relationship between the sapflow velocities at 152 cm and 448 cm

X-AXIS sapflow at 152 cm
Y-AXIS sapflow at 448 cm

るという結果になる。しかし、このような結果が得られる原因は、心-辺材部の境界付近においては、辺材部では心材部を伝わった熱の影響でヒートパルス速度が過小に算定され、心材部では辺材部を伝わった熱の影響でヒートパルス速度が存在するように測定されるためである。

従って、樹幹断面通過水量 (F) を求める式は

$$F = (\text{平均樹液流速}) \times (\text{測定位置での辺材部面積})$$

となる。

4-4 樹幹円周方向の樹液流の速度分布

同一高度の円周方向に等角度に設置された6本のセンサーによる測定から、ヒートパルス速度の樹幹円周方向の分布形状を調べた。測定を行った2高度についての9月26日から9月29日までの各チャンネルについての平均推定樹液流速を図8に示す。これを見る

と152cm,448cmのどちらの測定高度でも円周方向に樹液流速の速度分布があり、各チャンネルの平均樹液流速には最大で2.5倍の差異が見られる。

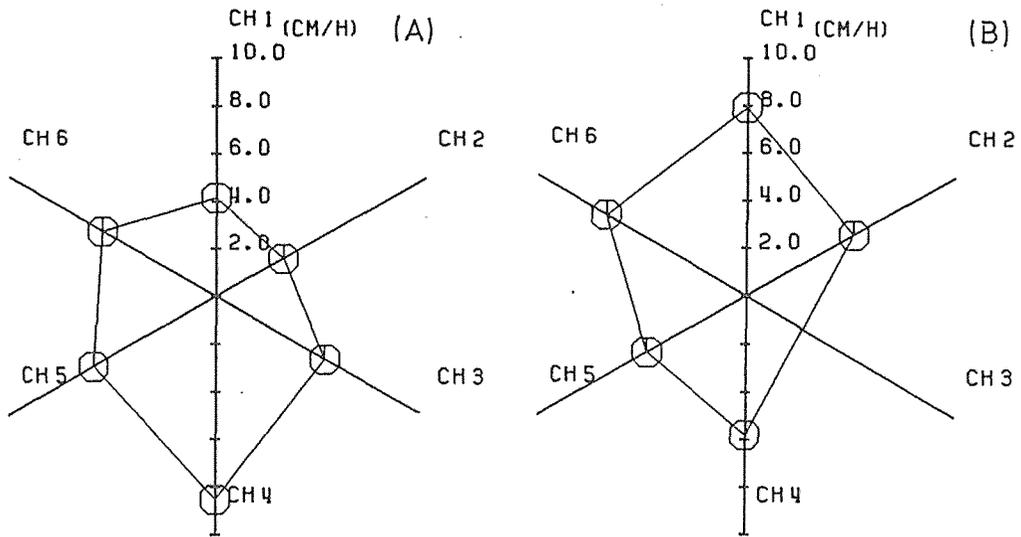


図-8 樹幹円周方向の平均樹液流速の分布

Fig. 8 The distribution of sapflow velocities in the direction of circumference

(A) 152 cm (B) 448 cm

そこで切断面から酸性フクシンを吸収させて染色状態を観察したところ辺材部にスポット状に非常に速く染色液が上昇する部分がみられた。このように樹液流速の速い部分にセンサーを設置したことが、設置位置による樹液流速の差異の原因となったことが考えられるが、この点に関してはさらに詳しい検討が必要である。

次に、このチャンネル毎の平均樹液流速と、それぞれのセンサーを設置した位置の辺材部の厚さとの関係を見ると、樹液流速の変動と比較して辺材部の厚さはほとんど円周方向では変化しないため両者の間には有為な関係がみられなかった。このように現段階では、樹幹の状態等から樹液流の円周方向の速度分布を求めるのは困難であると考えられる。そのため断面通過水量を推定するためには円周方向に複数のセンサーを設置するのは不可欠であると思われる。

4-5 断面通過水量、蒸散量の推定

断面通過水量 (=蒸散量) F の推定を

$$F = (6 \text{本のセンサーによって測定された推定樹液流速の平均値}) \\ \times (\text{測定位置での辺材部面積})$$

という式によって求め、吸水量との絶対値の比較を行った。各辺材部面積は、高さ152cmで63.35cm²、高さ448cmで49.68cm²である。

求められた断面通過水量 F と吸水量 A の関係を図9に示す。両者の関係を原点を通る直線で近似すると、得られた回帰直線は

$$\text{高さ152cm } F = 1.07A \quad (r^2 = 0.97)$$

$$\text{高さ448cm } F = 1.11A \quad (r^2 = 0.97)$$

となった。どちらも相関係数は高く、原点を通る直線による回帰が可能である。また傾きも1.07および1.11と1.0にかなり近く、この方法を用いるとヒートパルス法によってヒノキの単木蒸散量

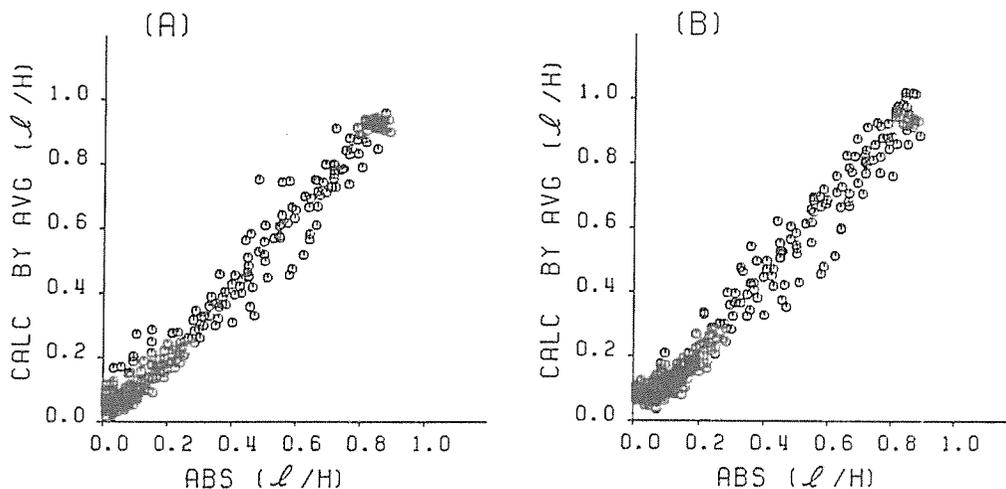


図-9 ヒートパルス速度測定高度の断面通過水量と吸水量の関係

Fig. 9 Relationships between the estimated amount of sapflow and the amount of water absorption

(A) 152 cm (B) 448 cm

を10%程度の誤差範囲内で求められたことになる。

5. ま と め

ヒートパルス法による単木蒸散量の推定法の確立とその測定精度の評価を行うために

- (a) 不均一場における熱移流拡散の数値解析による樹幹内の熱移動の考察
- (b) 同一高度での複数のヒートパルス法測定による樹液流動の2次元的分布形状の測定
- (c) ヒートパルス法と吸水量の並行測定

という手法を用いてヒートパルス法によるヒノキ(樹高14.08m, 地際直径 15.22cm)の単木蒸散量を推定し, これと吸水量を比較することによってこの方法の評価を試みた。その結果として

- (1) ヒートパルス速度-樹液流速間の関係はセンサーの設置条件がヒーターの上方向に1.0cm, 下方向に0.7cm, 樹液流障害直径0.21cmのとき

$$au = 0.260v_c^2 - 0.131v_c + 0.782 \quad (v_c \geq 3.12)$$

$$au = 1.386v_c - 1.321 \quad (0.927 \leq v_c < 3.12)$$

$$au = 0 \quad (v_c < 0.927)$$

au : 樹液流速 v_c : Crossによるヒートパルス速度となる。

(2) 樹幹円周方向に6本のセンサーを設置してヒートパルス法測定を行い, 得られたそれぞれのヒートパルス速度を(1)の式で補正して樹液流速を求め, その平均値に辺材部面積をかけることによって求めた樹幹断面通過水量を推定した。

地際から152cm, 448cmの2高度において求めた樹幹断面通過水量(F)と吸水量(A)を原点を通る直線で比較すると

$$\text{高さ 152 cm } F = 1.07A \quad (r^2 = 0.97)$$

$$\text{高さ 448 cm } F = 1.11A \quad (r^2 = 0.97)$$

となった。どちらも相関係数は高く、また傾きも 1.07 および 1.11 と 1.0 にかなり近く、この方法を用いるとヒートパルス法によってヒノキの単木蒸散量を10%程度の誤差範囲内で求められたことになる。

引用文献

- 1) Balek, J., Pavlik, O.: Sap stream velocity as an indicator of the transpirational process. *J. Hydrol.* **34**. 193-220, 1977
- 2) 奥村武信・水中進一・前田浩行: 広葉樹林の蒸散量推算へのヒートパルス法の適用に関する研究. *広葉樹研究*. **5**. 173-184, 1989
- 3) Closs, R.L.: The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem. *N. Z. J. Sci.* **1**. 281-288, 1958
- 4) Swanson, R.H., and Whitfield, D.W.: A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *J. Exp. Bot.*, **32**. 221-239, 1981
- 5) Marshall, D.C.: Measurement of sap flow in conifers by heat pulse transport. *Plant Physiol.* **33**. 385-396, 1958
- 6) Dunlap, F.: The specific heat of wood. *USDA For. Serv. Bull.* **110**, 1912
- 7) Rosenberg, D.U.: Method for the numerical solution of partial differential equations. American Elsevier, New York, 1969

Résumé

In order to measure the actual rate of transpiration by a heat pulse method, the velocity of water flow through the stem and the heat pulse velocity were simultaneously measured on a tree of *Chamaecyparis obtusa* (height 14.08m, ground diameter 15.22m) in Kiryu Experimental Watershed.

The estimated amount of sapflow agree within 10% of that measured by water absorption from the cutting stem.

To estimate the amount of sapflow, ① two-dimensional numerical analysis of the physical heat flow system was carried out, and it is obtained from the relationship between the heat pulse velocity and sapflow velocity, ② the distribution of sapflow velocity in the direction of circumference was measured by six sensors implanted at the same height.