

ヒートパルス速度測定装置の作製とその 蒸散量測定への適用

——針葉樹・広葉樹における測定例——

An Apparatus for Measuring Heat Pulse Velocity and Its Application for Transpiration Flux Estimation

——Examples of Measurements in Coniferous and Deciduous Trees——

杉田 倫明*・出口 賢二**・古藤田一雄***

Michiaki SUGITA*, Kenji DEGUTSCHI** and Kazuo KOTODA***

I はじめに

森林植生からの蒸発散は、流域の水収支を考える上で重要な因子であることから、近年様々な方法でその研究がなされてきた。そのうちの一つに樹木の幹の内部を流れる樹液流の速度を直接はかって、蒸散量を知ろうとする試みがある。これにはいくつかの測定法があるが、幹の直径の大きい樹木に適用でき、かつ比較的樹木を損傷する割合の少ないのがヒートパルス法である。

ヒートパルス法は種々の試行錯誤の末、Mer-shal (1958) により理論的な研究がなされ、Cross (1958) によってその測定法が確立された。わが国では、森川 (1972) により測定装置の試作がなされ、森川 (1974) や大櫛ら (1981) などにより、主に針葉樹について測定が行われてきた。

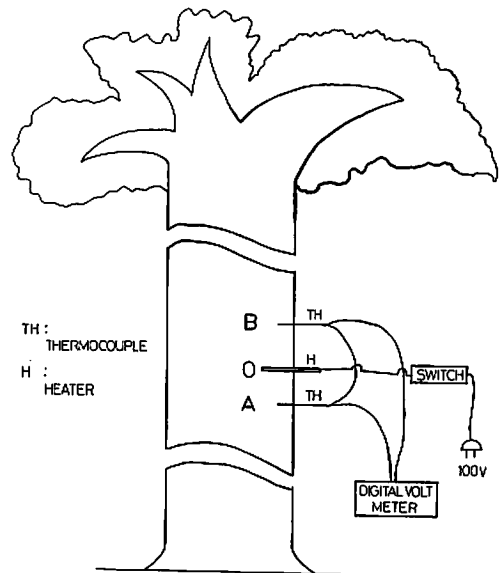
本報では、熱電対をセンサーとしたヒートパルス速度測定装置を作製し、アカマツとコナラについて測定を行ない、若干の考察を加えた。

II ヒートパルス法の原理と測定方法

1) ヒートパルス法の原理

今、第1図に示すように、樹木の幹の一部のO

点にヒートパルスを与えるヒーター、その上方のB点、下方のA点に $\overline{OA} < \overline{OB}$ となるようにして温度センサーを挿入する。ここでO点においてヒートパルスを与えるとA点、B点におけるヒートパルスを与えてから t 秒後の温度は、



第1図 ヒートパルス法の原理

*筑波大学・院・地球科学 **筑波大学・院・環境科学 ***筑波大学水理実験センター (1983年4月15日受理)

$$T_A(t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi K t}} \exp \left[-\frac{(-OA - Vt)^2}{4 K t} \right] \dots (1)$$

$$T_B(t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi K t}} \exp \left[-\frac{(OB - Vt)^2}{4 K t} \right] \dots (2)$$

となる。ここで、 T : 温度、 Q : ヒーターにより与えられる熱量、 K : 熱伝導率、 V : ヒートパルスの伝播速度 (以下ヒートパルス速度と称する)、 t : 時間であり、添字 A 、 B はそれぞれ第1図のA点、B点をあらわす。

ここで、(1)、(2)式 $T_B = T_A$ とおくと、

$$V = \frac{OB - OA}{2 t_0} \dots (3)$$

が得られる。 t_0 は、ヒートパルスを与えてから $T_A = T_B$ となるのに要した時間である。すなわち、 OB 、 OA の距離と t_0 の値を測定すれば、センサーを設置した位置におけるヒートパルス速度を得ることができる。

一方、ヒートパルス速度と実際の樹木中を流れる樹液流速の関係は、Mershal (1958) の理論的な解析により、以下の式で与えられる。

$$u = \frac{\rho t (Ct + Mt \cdot Cw)}{\rho_w \cdot Cw} \cdot V \dots (4)$$

ここで、 u : 樹液流速、 ρ : 密度、 C : 比熱であり、添字 t 、 w はそれぞれ樹木、水をあらわす。また Mt は、樹木の水分量で、

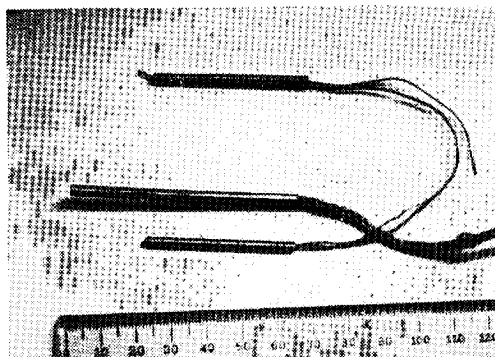
(生重量 - 乾重量) / 乾重量

によって与えられる。(4)式で示される樹木の比熱・水分量・密度は変数であるが、短期間では大きく変わらないとすると、樹液流速とヒートパルス速度は比例関係となり、後者を用いて樹液流速の指標とすることが可能となる。

2) ヒートパルス速度測定装置

前述の理論にしたがって、ヒートパルス速度測定装置を作製した。

ヒートパルスを与えるヒーターには、カートリッジヒーター (坂口電熱製、直径3.1mm、長さ6.4cm、70W) を使用した。温度センサーには熱電対 (銅-コンスタンタン、直径0.32mm) を用い、2つの熱電対を直列に接続することで、A点とB



第2図 ヒートパルス速度測定装置のセンサーとヒーター部分

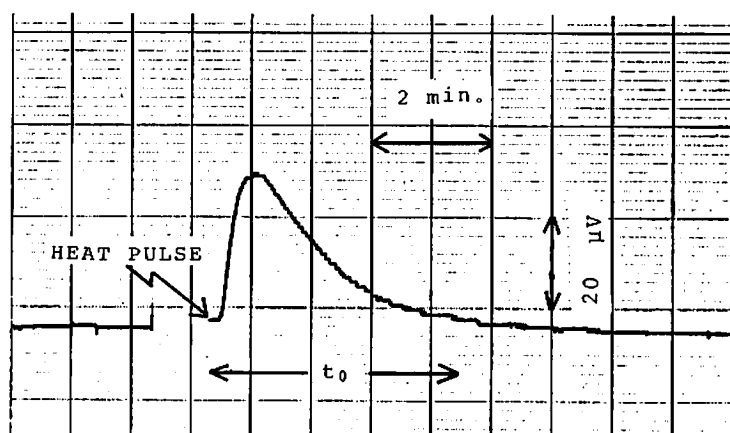


第3図 ヒートパルス速度測定装置のセンサーとヒーターをコナラにセットした様子

点の温度差を直接測定するようにした。また、熱電対は直径3.0mmの真鍮パイプに挿入し、樹脂系接着剤で固定した。センサーとヒーターを第2図に示す。熱電対の出力は、デジタルボルトメーターおよびペンレコーダーに接続し計測を行った。センサーとヒーターの間隔 OB 、 OA をそれぞれ1.0cm、0.7cmとし、樹幹に挿入した。コナラにセットした様子を第3図に示す。

ヒーターによって約1秒間のヒートパルスを与える。再びA点とB点の温度差がゼロにもどるまでの時間をストップウォッチにより計測し、この値を t_0 とする。(3)式に各値を代入することで、ヒートパルス速度が得られる。ヒートパルスを与えてからのA・B点の温度差の変化の様子を第4図に示す。

3) アカマツとコナラにおけるヒートパルス速度と熱収支の測定



第4図 熱電対出力の変化

1982年9月から11月にかけて、アカマツとコナラのヒートパルス速度の日変化を測定した。

アカマツでの測定は、筑波大学水理実験センター南側にある平均樹高10mのアカマツ林内の異なる胸高直径（8.5cm・17.9cm）の2本のアカマツについて行った。センサーの位置は、幹表面よりそれぞれ1.0cm、2.0cmとした。測定間隔は、30～60分でそれぞれ数回の測定を行い平均を求めた。

また、全天日射量の値として、水理実験センター熱収支水収支観測圃場で測定されている1時間ごとの積算値を用いて、ヒートパルス速度の変化と比較した。

コナラでの測定は、東京都八王子市南西部にある東京農工大波丘地利用実験実習施設内の平均樹高17.5mのコナラ林内の同一樹木について、異なる2高度（1.2m、12m）で行った。対象としたコナラは、胸高直径10.4cmで幹表面より2.0cmの位置にセンサーを設置した。測定間隔は、30～90分でそれぞれ1回ずつの測定を行った。

またコナラの場合、ヒートパルス速度の変化と比較するため、樹冠上の潜熱フラックスの日変化をボウエン比・熱収支法（10月中）、渦相関・熱収支法（11月中）によって求めた。ボウエン比・熱収支法によると、潜熱フラックスは、次式で求まる。

$$LE = \frac{1}{1 + \beta} (R_n - G) \quad (5)$$

ここで、 LE ：潜熱フラックス、 R_n ：正味放射量、 G ：地中熱流量である。またボウエン比 β は、

$$\beta = r \frac{\Delta T_a}{\Delta e} \quad (6)$$

で表わされる。ここに、 r ：乾湿計定数であり、 ΔT_a 、 Δe はそれぞれ、異なる2高度間の温度差、水蒸気圧差である。

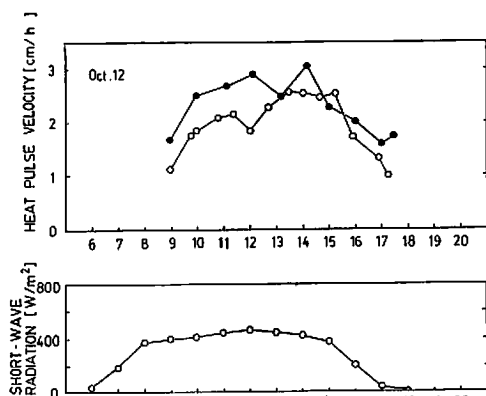
正味放射量は、林内に設置したタワーの地上17.5mにセットした正味放射計（英弘精機産業社製、CN-11型）によって求めた。地中熱流量は地表面下約1cmにセットした地中熱流板（Hy-Cal Engineering 社製B1-2-2000-WP-T型）により求めた。また、ボウエン比算出に必要な乾湿球温度は、地上16、20、22.3、23mにセットした自作の乾湿計によって求めた。

渦相関・熱収支による潜熱フラックスの算出は占藤田（1982）によった。

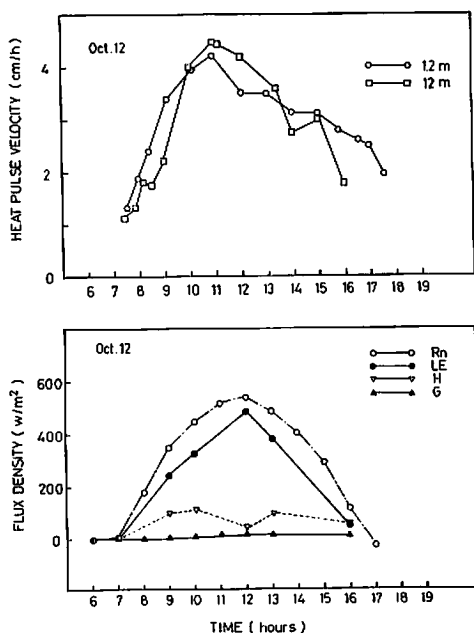
III 結果および考察

1) アカマツとコナラにおけるヒートパルス速度の日変化

アカマツとコナラの同一日におけるヒートパルス速度の日変化の測定例として、10月12日の晴天



第5図 アカマツにおけるヒートパルス速度と全天日射量の日変化。白丸は胸高直径8.5cm 黒丸は17.9cmのそれぞれヒートパルス速度をあらわす



第6図 コナラにおけるヒートパルス速度と樹冠上の熱収支各項の日変化

日のデータをそれぞれ第5図、第6図に示す。

アカマツとコナラのヒートパルス速度の日変化は、それぞれ若干のばらつきをもっているものの全天日射量（アカマツ）、潜熱フラックス（コナラ）の変化とよく対応しており、ヒートパルス速度は蒸散強度のよい指標となっていることが示さ

れる。

アカマツとコナラのヒートパルス速度は、そのピーク時において前者が2.5~3.0cm/h、後者が4.0~4.5cm/hであった。これらの値を樹液流速速度に換算するために、(4)式中の各項の値として、アカマツで $Mt=1.23$ (大櫛ほか, 1981) $\rho t=0.48$ (貴島ほか, 1962) とし、コナラで、地上1~15mまでの15ヶ所のサンプル調査の結果として、 $Mt=0.71$, $\rho t=0.52$ (貴島ほか, 1962) また Ct の値はともに0.33とすると、(4)式は、

$$u=0.749 \cdot V \text{ (アカマツ)} \quad (7)$$

$$u=0.541 \cdot V \text{ (コナラ)} \quad (8)$$

となる。したがって、ピーク時の樹液流速速度は、アカマツとコナラでそれぞれ、1.9~2.3cm/h、2.2~2.4cm/hとなり、両者の速度に大差はない。これに対して佐伯(1981)は、針葉樹と広葉樹の幹の一部を切り取り、両端に圧力差をかけ水の通りやすさを測定した結果を示している。それによると、水の通りやすさを示す透水係数ともいうべき値が、広葉樹で1.8~3.5cm²/bar/sec、針葉樹で0.6cm²/bar/secで、同じ圧力差のもとでは広葉樹の方が3倍以上の早い樹液流速速度をもつという。これは、測定法のちがいの点で単純な比較はできないものの、今後検討を要する問題である。

また、ピークの出現時刻を見ると、アカマツでは13~15時付近にあり、全天日射量のピークより1~3時間おくれていた。これに対してコナラでは、11時~11時30分にピークが出現し、潜熱フラックスのピークと一致している。アカマツでのこのような位相のおくれは、大櫛ほか(1982)も指摘しており、樹幹の貯留分に原因を帰している。コナラでこのような位相のおくれが観測されなかったことは、コナラのような広葉樹では貯留分が針葉樹に比してかなり小さい値であることが示唆される。

コナラでは、地上1.2mと12mの2高度で測定を行った。両者を比較すると、1.2mの値は滑らかに変化しているのに対し、12mの値はやや変動が大きい。これは、12mの方は樹冠の直下であり葉面での蒸散活動の変化がすぐ伝わるのに対し、

12mではこの変化がおくれて伝わりかつ平均化されるためと思われる。したがって、ヒートパルス速度を蒸散量変化の指標とする場合、前述の貯留効果も加えて、その測定位置を吟味する必要がある。すなわち、時間単位で変化を知りたい場合特に針葉樹のように貯留分が大きいと思われる樹木に対しては、樹冠直下で測定の方がよいようである。これに対して、日単位程度の値を知ろうとする場合、ある程度平均化した値が得られる幹下部での測定が向いていると思われる。

2) ヒートパルス速度測定上の問題点

1982年11月15日の曇天時に、コナラで測定したヒートパルス速度と熱収支各項の変化の様子を第7図に示す。この時、コナラの葉は紅葉の初期でわずかに変色している状態だった。

潜熱フラックスとヒートパルス速度の変化を比較すると、後者の値が高度とも著しく変動していることが認められる。他の測定例と比較しても、樹液流速がこのように変化しているとは考えにくく、この結果はヒートパルス速度の低速度領域

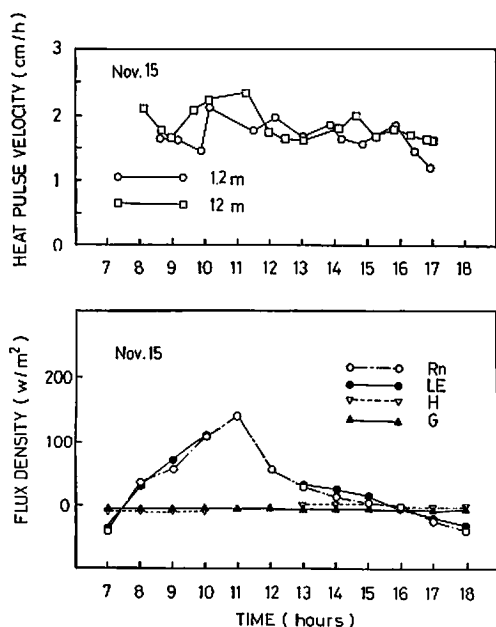
における測定誤差が大きく影響していると思われる。すなわち、ヒートパルス速度が小さい場合、(3)式から明らかなように、 OB 、 OA の値が定数であるので t_0 の値が大きくなる。したがって、ヒートパルスを与えてからA点とB点の温度差がゼロになるのに要する時間が大きくなっていく。その結果、測定中に樹液流速が定常であるとした仮定が満たされないこと、幹表面からの熱の出入りの影響などにより誤差が大きくなっていく。

したがって、降雨中や夜間などヒートパルス速度のおそい時期に測定しようとする時は、 OB 、 OA の間隔を変えて測定時間を短くするなどの対策が必要と思われる。

また、これまでは樹液流速とヒートパルス速度が比例関係にあるとして、前者すなわち蒸散量の指標としてヒートパルス速度を扱ってきた。一方、我々が必要とする値は、ある地域全体からの蒸散量である。ヒートパルス速度測定からこの値を得る方法として、

- ① ヒートパルス速度から樹液流速への換算
- ② 樹液流速から対象とした樹木の蒸散量への換算

③ 一本の樹木の蒸散量から地域全体の蒸散量への換算の過程が必要である。このうち①は(4)式を用いることにより比較的容易に実行できる。②の過程で問題となるのは、蒸散量=樹液流速×断面積により蒸散量を求める場合、樹液流速が幹の直径方向で異なることである。従来報告ではヒノキについて断面全体であり差異はないとするもの(森川, 1974)アカマツについて幹の表面近くにピークがあり以下中心に向かって2次曲線型に減少するとしたもの(大櫛ほか, 1981)などがあり、樹種・季節によるちがいが予想される。従って一本の樹木について蒸散量を知ろうとする場合、ある断面について直径方向に数点センサーをセットし、同時にヒートパルス速度を測定する必要があると思われる。③の過程については、ヒートパルス速度測定高度での対象とした林分の樹幹の全断面積を測定して、ヒートパルス速度を測定した樹木の断面積との割合から林分全体の蒸散



第7図 コナラにおけるヒートパルス速度と樹冠上の熱収支各項の日変化

量を得るなどの方法が考えられるが、測定を行った樹木の代表性などの問題があり、今後の検討を要する。

IV おわりに

ヒートパルス速度測定装置を作製し、アカマツとコナラについてその測定を行った。同時に測定した全天日射量あるいは熱収支各項の時間変化との比較から、ヒートパルス速度が蒸散強度のよい指標となることがわかった。また、アカマツとコナラの測定結果の比較から、幹の貯留成分が前者で大きく、後者で小さいこと、樹液流速度には大きな差異がないことが示された。

一方、今後の課題として、低速度領域でのヒートパルス速度測定上の問題点、林分全体からの蒸発量を知るための方法を議論した。

謝 辞

本研究を行なうにあたって、研究の場を心よく提供して下さった東京農工大学農学部丹下勲教授および教職員の方々、筑波大学水理実験センター教職員の方々に厚く御礼申しあげます。また、現地に建設した気象観測塔を使用させていただいた京都大学防災研究所水資源研究センター池淵周一教授にも厚く感謝いたします。

文 献

- 大橋政行・及川武久・森川靖 (1981) : 平地アカマツ林の熱収支・水収支特性について、「霞ヶ浦およびその周辺域の生態系動態におよぼす人間活動の影響」研究班報告書、文部省。
- 貴島恒夫・岡本省吾・林昭三 (1962) : 『原色木材大図鑑』保育社、204 P.
- 古藤田一雄 (1982) : 落葉広葉樹林の蒸発散量と林内の乱流拡散係数、筑波大水理実験センター報告、6、63～74。
- 佐伯敏郎 (1981) : 植物体内の水移動と排出、熊沢喜久雄編：『水とイオン』朝倉書店、92～97。
- 森川靖 (1972) : 樹液流測定装置と測定法、日林誌、57、166～171。
- 森川靖 (1974) : ヒノキの樹液の流れ——林木の水収支と関連して——東大演報、66、251～297。
- Cross, R. L. (1958) : The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem, *N. Z. J. Sci.*, 1, 281 - 288.
- Mereshal, D. C. (1958) : Measurement of sap flow in conifers by heat transport, *Plant physiology*, 33, 385 - 396.