

2S-3

ヒートパルス茎内流速測定における センサーの位置決め

井須尚紀 清水忠昭 菅田一博 谷口 弘

鳥取大学工学部知能情報工学科 熊本電波工業高等専門学校

1. はじめに

屋外で植物の蒸散流速を簡便に計測するために、ヒートパルスを茎内の1点に与えて茎内流による熱伝導を測定する方法(ヒートパルス法)が用いられている。ヒータを挟む上下2箇所の測温点間の温度差や上方測温点における温度変化を測定するが、測温点の位置と測定精度の関係を系統的に調べてセンサー位置の最適化を図る試みは行われていない。本研究では、ヒータ・温度センサーの位置と測定精度との関係をシミュレーションによって求め、3点測温式ヒートパルス茎内流速測定法¹⁾によって茎内流速の測定レンジを拡張し得ることを示し、測定精度の高い最適なセンサー配置について検討する。

2. 茎内流速の測定精度

茎の側方より垂直に刺入した線ヒータから単位長さあたり H (mJ/mm)の熱量を瞬時に加えたとき、ヒータから上方 x (mm)における時間 t (s)後の温度変化 T (K)は、ヒートパルス速度を v (mm/s)とすると

$$T = \frac{H}{4\pi\rho ck t} \exp\{- (x - vt)^2 / 4kt\}$$

で与えられる。ここで、 ρ (mg/mm³), c (mJ/mg·K), k (mm²/s)はそれぞれ茎・樹液混合物の密度, 比熱, 熱拡散係数である。この関係を用いると、ヒータからの距離 x_1 および x_2 にある測温点間の温度差 ΔT を測り、 $\Delta T = \Delta T_0$ となる時間 $t = t_0$ を測定することでヒートパルス速度 v を求めることができる。時刻 t_0 における温度差 ΔT_0 は v の関数となり、 $\Delta T_0 = 0$ のときの解 $v = (x_1 + x_2) / 2t_0$ のまわりでTaylor展開することによって、 $\Delta T_0 = 0$ 近傍では

$$\Delta T_0 = \frac{(x_1 - x_2) H}{8\pi\rho ck^2 t_0} \exp\{- (x_1 - x_2)^2 / 16kt_0\} \left(v - \frac{x_1 + x_2}{2t_0} \right)$$

と近似することができる。これより、ヒートパルス速度 v は

$$v = \frac{x_1 + x_2}{2t_0} + \frac{8\pi\rho ck^2 t_0 \Delta T_0}{(x_1 - x_2) H} \exp\{ (x_1 - x_2)^2 / 16kt_0\}$$

で与えられる。 x_1 , x_2 , H , t_0 , ΔT_0 を測定変数と考えて誤差伝搬法則を適用し、 $\Delta T_0 = 0$ としてヒートパルス速度 v の測定精度を求めると

Optimal Positions of Thermocouples in a Heat Pulse Sensor for Measuring Sap Flow Velocity

Naoki Isu, Tadaaki Shimizu, Kazuhiro Sugata, Hiroshi Taniguchi

Department of Information and Knowledge, Faculty of Engineering, Tottori University

4-101 Koyama-cho minami, Tottori, Tottori 680, Japan

$$\left(\frac{\sigma_v}{v}\right)^2 = \frac{1}{(x_1+x_2)^2} (\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 + 4v^2\sigma_t^2) + \left(\frac{4\pi\rho ck^2}{v^2H}\right)^2 \frac{(x_1+x_2)^2}{(x_1-x_2)^2} \exp\left\{v(x_1-x_2)^2/4k(x_1+x_2)\right\} \sigma_T^2$$

となる。ここで、 $\sigma_{x_1}^2$, $\sigma_{x_2}^2$, σ_t^2 , σ_T^2 はそれぞれ x_1 , x_2 , t_0 , ΔT_0 の誤差分散である。

3. 測温点の最適位置

上式の値を最小にし最も高精度の測定を為し得る測温点の最適位置 x_1 , x_2 はヒートパルス速度 v の関数となる。しかし、茎内に刺入した温度センサーを茎内流速に対応して移動させると茎組織を破壊するため、これを可動にすることはできない。広い測定レンジに亘ってより高い精度で測定可能な固定点を定めることが必要である。 $\rho=0.9\text{mg/mm}^3$, $c=2.5\text{mJ/mg}\cdot\text{K}$, $k=0.25\text{mm}^2/\text{s}$, $H=150\text{mJ/mm}$, $\sigma_{x_1}=\sigma_{x_2}=0.2\text{mm}$, $\sigma_t=0.05\text{s}$, $\sigma_T=0.05\text{K}$ とおき、 $v=0.01\sim 5.0\text{mm/s}$ の範囲で最適な温度センサーの配置を検討した。図1は10%以下の誤差で測定可能なセンサー位置の領域を示したものである。 $v=0.01\sim 0.05\text{mm/s}$ および $v=0.05\sim 5.0\text{mm/s}$ の2レンジに分け2組の測温点を設けることによって、全範囲を10%以下の誤差で測定できることが示された。2組の測温点の内1点は共通にとって3点測温方式とし、茎への侵襲や加工上の制約から温度センサー間およびヒータとの間隔を3mm以上とすることを条件に小型化を図るものとする。共通測温点の位置 $x_A=9\text{mm}$ とし、他の2点の位置 x_B , x_C を変化させて、ヒートパルス速度 v とその測定精度の関係を図2に示す。 $x_B=-4\text{mm}$, $x_C=6\text{mm}$ において、 $v=0.005\sim 10\text{mm/s}$ の範囲で高精度の測定を得ることが示された。

4. おわりに

3点測温方式によるヒートパルス茎内流速測定法の開発にあたって、ヒータ・温度センサーの配置と測定精度との関係をシミュレーションによって求め、広い測定レンジを持つような最適センサー配置を検討した。

参考文献

- 1) 清水, 菅田, 井須, 谷口; 3点測温方式によるヒートパルス茎内蒸散流速測定法, 平成5年度電気学会全国大会講演論文集, No38.

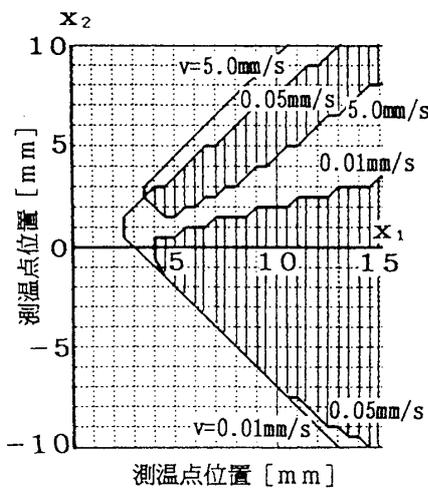


図1 誤差10%以下の測温点配置の領域

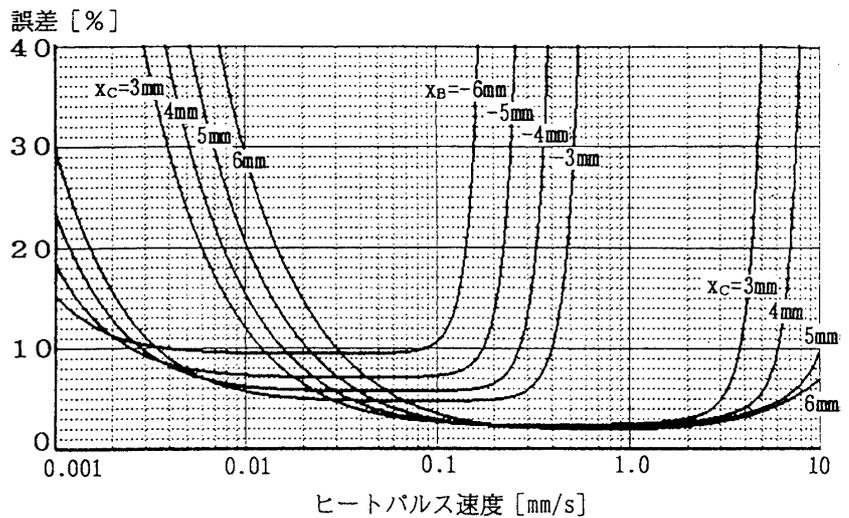


図2 3点測温方式による測定精度