

## 茎熱収支法による茎内流量測定に関する研究

— ダイズへの適用 —

初井和朗<sup>†</sup>・坂口朋軌・下田代智英・肥山浩樹・竹内真一<sup>1)</sup>

(利水工学研究室)

平成23年10月7日 受理

### 要 約

茎熱収支法によるダイズの茎内流量測定に関して、茎表面の温度差に基づく従来法は、低い流量では秤量法に近い値を示すが、日中の $100\text{g h}^{-1}$ 以上の蒸散量では過大評価する傾向がみられた。茎内部の温度差に基づく補正法による茎内流量は、茎内流による対流熱量が、放射方向への損失熱量より卓越する場合には、秤量法による蒸散量の時間変化と良く一致した。時間単位の蒸散量に関しては、従来法と補正法を組み合わせた方法と秤量法との残差の標準偏差は $7\text{g h}^{-1}$ 、および両者の量の相関係数は0.992であった。日蒸散量に関しては、茎表面温度差を用いた従来の茎熱収支法では日蒸散量を約20%過大評価するが、組み合わせ法と秤量法との差はわずかに3%であり両者には良い一致がみられた。

キーワード：茎内流量、茎熱収支法、蒸散量、ダイズ

### 緒 言

蒸散量は、灌漑分野における作物消費水量の評価に重要であり、種々の推定法および測定法が提案されている。そのなかで茎熱収支法[1]は、茎に熱を与えて茎の温度変化を測定し茎内流量を求めるもので、蒸散量の測定として有効と考えられている。本研究では、茎熱収支法をポット栽培のダイズに適用し、電子天秤により測定した蒸散量の時間変化と比較し、その測定精度を検討するとともに、測定上の課題および改良点について考察を加える。

### 材 料 と 方 法

#### 1. 茎熱収支法

Fig.1に示すように、作物茎部をヒータにより定期的に加熱した場合、茎断面方向の温度分布を一律と仮定し、茎内の貯熱量を無視できるとする[1]と、ヒータから茎部に与えた熱量 $P(\text{W})$ は、茎内流によって輸送される対流熱量 $Q_f(\text{W})$ 、茎の軸上下方向へ

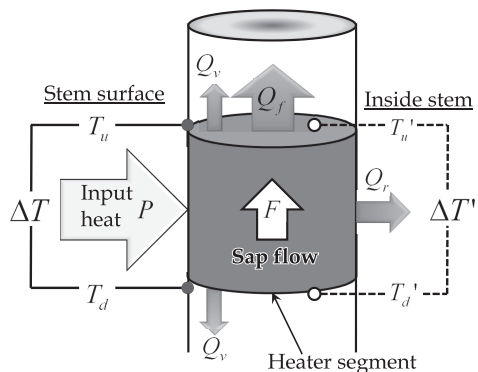


Figure 1. Stem heat balance.

の伝導熱量 $Q_c(\text{W})$ 、および放射方向への損失熱量 $Q_r(\text{W})$ に分けられ、次の熱収支式が成り立つ[2]。

$$P = Q_f + Q_r + Q_c \quad (1)$$

ヒータからの熱量 $P$ は、次式で与えられる。

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

<sup>†</sup> : 連絡責任者：初井和朗 (鹿児島大学農学部利水工学研究室)

Tel: 099-285-8692, E-mail: momii@agri.kagoshima-u.ac.jp

<sup>1)</sup> 〒885-0035 宮崎県都城市立野町3764番地 1 南九州大学環境園芸学部

ここに、 $V$ ：入力電圧(V)、 $R$ ：ヒータ部の抵抗( $\Omega$ )である。

次に、放射方向の損失熱量 $Q_r$ は、

$$Q_r = K_g E \quad (3)$$

ここに、 $K_g$ ：ゲージ係数( $W V^{-1}$ )、および $E$ ：放射方向の温度勾配に対応した出力電圧(V)である。

茎の上下方向の伝導熱量 $Q_v$ は、軸の上方向 $Q_u$ (W)と下方向 $Q_d$ (W)の和として

$$Q_v = Q_u + Q_d \quad (4)$$

と表され、 $Q_u$ および $Q_d$ はフーリエの熱伝導の法則より

$$Q_u = K_s A \frac{\Delta T_u}{\Delta x} \quad (5)$$

$$Q_d = K_s A \frac{\Delta T_d}{\Delta x} \quad (6)$$

ここに、 $K_s$ ：茎の熱伝導係数( $W m^{-1} K^{-1}$ )、 $A$ ：茎の断面積( $m^2$ )、 $x$ ：軸方向の距離座標(m)、 $T_u$ 、 $T_d$ ：ヒータ加熱部直上および直下の温度(K)、 $\Delta T_u$ はヒータ加熱部上方での距離 $\Delta x$ (m)間の温度差(K)、および $\Delta T_d$ はヒータ加熱部下方での距離 $\Delta x$ 間の温度差(K)である。

茎内流により輸送される対流熱量 $Q_f$ は、ヒータ加熱部に流入・流出する水の温度差 $\Delta T = T_u - T_d$ の関数として

$$Q_f = c_w F \Delta T \quad (7)$$

ここに、 $c_w$ ：水の比熱( $J g^{-1} K^{-1}$ )、および $F$ ：茎内流量( $g s^{-1}$ )である。従って、茎内流量 $F$ は、式(1)と(7)より

$$F = \frac{P - Q_v - Q_r}{c_w \Delta T} \quad (8)$$

また、式(3)のゲージ係数 $K_g$ は、茎内流が無いとき、例えば夜間において $F = 0$ と仮定できるとき、式(3)、(8)より、次式から求めることができる。

$$K_g = \frac{P - Q_v}{E} \quad (9)$$

## 2. 実験

実験は、鹿児島大学附属農場ガラスハウス内で、内径25cmのポット植えのダイズ(*Glycine max*)を用いて行った。Fig.2に実験状況(2010年9月11日撮影)を示す。ポットへの播種は2010年5月21日であり、実験日は2010年9月8日～9月10日の3日間である。

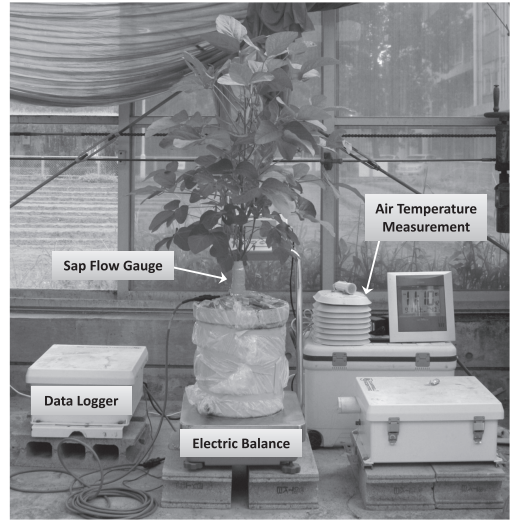


Figure 2. Outline of soybean crop experiment.

ゲージ装着部の茎直径は8mmである。ポットからの蒸発を防ぐためにポット全体をビニールで被覆した。比較のため、ポットの重量変化を感度0.5gの電子天秤(GP-40K、(株)エー・アンド・デイ、日本)により測定した。この測定により得られる値を、秤量法によるダイズからの蒸散量とする。ポット内の土壌水分の減少に伴う作物(ダイズ)の水ストレスを避けるために、電子天秤で測定した日消費水量相当分を深夜から朝において2回に分けて灌水(灌水量：9月9日は1192g、および9月10日は1200g)した。なお、実験終了後に測定したダイズの葉面積は7043  $cm^2$ であった。

蒸熱収支法による茎内流量測定には、本実験では茎直径8～12mmに適用可能なゲージ(SGB9, Dynamax Inc., USA)を用いた。ヒータの軸方向の長さは2cmであり、ヒータと茎との密着性を高めるために、ダイズ茎表面にグリス(Dow Corning 4, Dow Corning Corp., USA)を塗布した。式(5)、(6)の伝導熱量を求めるための熱電対間距離は $\Delta x = 4$  mmである。

茎内部の温度測定には、直径0.1mmの銅・コンスタンタン熱電対(ポリエステル被覆熱電対線T0.1, 石川産業)を、茎内部に表面から約2mm挿入し、Fig.1のヒータ加熱部上下の茎内温度 $T'_u$ 、 $T'_d$ を測定した。本論文では、茎表面での温度 $T_u$ 、 $T_d$ と茎内部の温度 $T'_u$ 、 $T'_d$ を区別して用いる。ゲージSGB9および熱電対のデータは、10秒間隔でサンプリングし、20分平均でデータロガー(CR1000, Campbell

Scientific Corp., USA) に収集した。なお、ガラスハウス内の気温は、Fig. 2に示すように、ゲージ装着高さにおいて、ソーラーラジエーションシールド(小型百葉箱)内に設置した温湿度計(U23-002, Onset Computer Corp., USA)を用いて、30分間隔で実測した。

解析に使用したパラメータとして、式(3)のゲージ係数 $K_g$ には、実験の前日までの夜間において、式(9)から求めた値の最小値から、 $K_g=0.965 \text{ W mV}^{-1}$ を与えた。ゲージ係数の値として、Gerdes et al.[1]がダイズに適用した場合 $0.745 \text{ W mV}^{-1}$ 、およびGordon et al.[3]のバレイショの場合 $0.79\sim 1.01 \text{ W mV}^{-1}$ の例がある。また式(5)、(6)の茎の熱伝導係数 $K_s$ は、草本類で一般に与えられている $K_s=0.54 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ を用いた[1, 3, 4]。入力電圧は $V=4 \text{ V}$ 、ゲージ抵抗は $R=127.1 \Omega$ であり、式(2)よりヒータからの入力熱量 $P=0.125 \text{ W}$ となる。なお、水の比熱には $c_w=4.186 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ を与えた。

### 結果と考察

Fig. 3には、2010年9月8日～10日の3日間において観測した秤量法による蒸散量、式(8)の右辺の分母に茎表面の温度差 $\Delta T$ を用いた従来の茎熱収支法(Stem Heat Balance Method; 図中ではSHBMと略記)による茎内流量(以下、従来法と記す)、および茎表面の代わりに茎内部の温度差 $\Delta T'$ を式(8)に用いて補正した茎内流量(以下、補正法と記す)の時間変化を示す。夜間、早朝および夕方と比較的低い流量では、従来法は秤量法と概ね一致している。しかし、日中において蒸散量がピークになるとき、従来法は過大評価する傾向にある。一方、補正法では、日中の蒸散量の変化を概ね再現している。ただし、補正法では、早朝および夜間において大きな値が算定されており、秤量法による蒸散量の時間変化と大きく相違している。

Fig. 4には、秤量法による蒸散量に対する従来法と補正法の比較を示す。従来法では、1:1の直線から上側にずれ、約20%過大評価している。また、補正法では、 $25 \text{ g h}^{-1}$ 以下の蒸散量において、Fig. 3で示した早朝と夜間での相違が表れている。

Fig. 5(a)には、2010年9月10日の茎内部の温度 $T'_s$ 、 $T'_i$ 、および気温の時間変化を示す。ガラスハウス内の気温は、朝5:00頃に最低(約27℃)となり、12:00～13:00に最大(約41℃)まで上昇し、その後徐々に

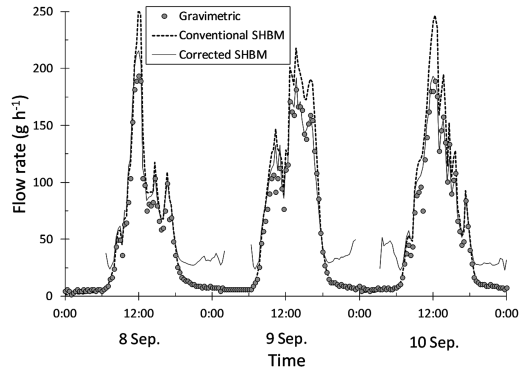


Figure 3. Comparison of sap flow rate by the stem heat balance method (SHBM) and gravimetric transpiration rate from September 8 to 10, 2010.

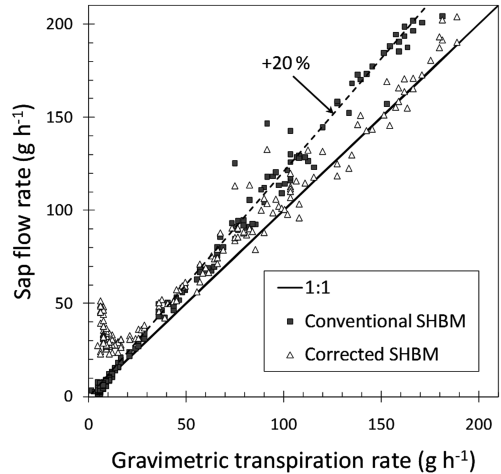


Figure 4. Relationship between the conventional stem heat balance method based on the stem-surface temperature difference and the corrected heat balance method by the temperature difference in the stem.

減少している。茎内部のヒータ下部の茎温度 $T'_i$ は、気温の変化に遅れながら応答し、朝7:00頃に最低(約29℃)になり、15:00～16:00に最大(約39℃)まで上昇し、その後徐々に減少している。この間、ヒータ上部の茎温度 $T'_s$ は、下部の温度 $T'_i$ より常に高い値となっている。次に、蒸散がほとんど無いと考えられる深夜0:00～3:00においては、Fig. 5(a)に見られるように、茎内部の温度 $T'_s$ 、 $T'_i$ はほぼ同じとみなされる。この間の両者の差をとると $-0.1^\circ\text{C} < \Delta T' < 0.3^\circ\text{C}$ となる。温度測定精度の問題もあり、本研究では、 $0.2^\circ\text{C}$ 未満の温度差 $\Delta T'$ の場合には、解析から除外した。したがって、補正法では、温度差

$\Delta T' < 0.2^\circ\text{C}$ の時には解析対象から除外し、前述の Fig. 3には、この部分の流量は記載していない。

Fig. 5(b)には、9月10日の茎表面の温度差  $\Delta T$  と、茎内に挿入した熱電対により測定した茎内部の温度

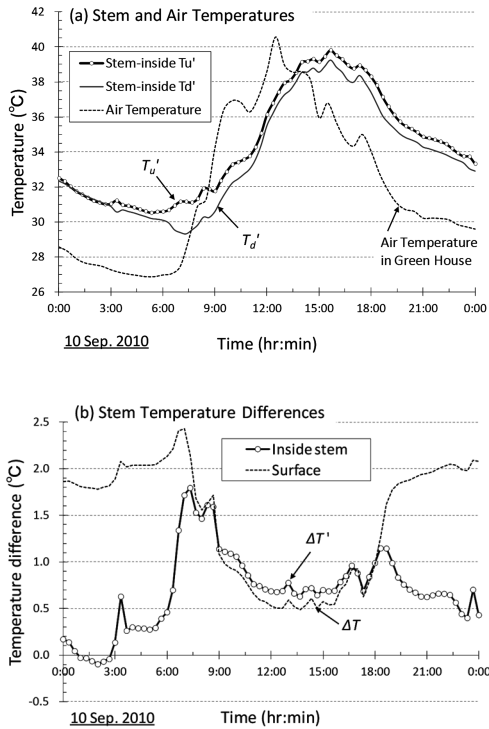


Figure 5. (a) Diurnal change of temperature inside stem and air temperature in the green house, and (b) diurnal change of stem-surface and stem-inside temperature differences on September 10, 2010.

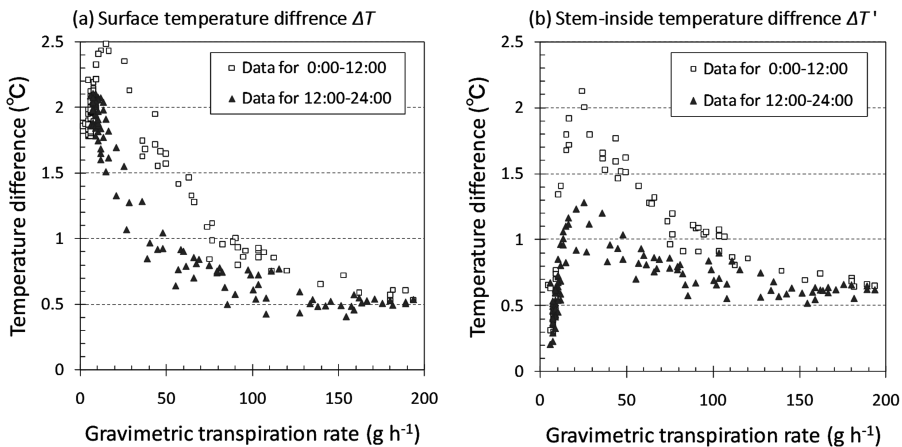


Figure 6. Change in temperature differences  $\Delta T$  at the stem surface and  $\Delta T'$  inside the stem versus gravimetric transpiration rate.

差  $\Delta T'$  の時間変化を示す。日中、蒸散量がピークとなる時間帯において、茎内部の温度差は  $\Delta T' = 0.7^\circ\text{C}$  であり、一方、表面は  $\Delta T = 0.55^\circ\text{C}$  である。約  $0.15^\circ\text{C}$  の差であるが、式(8)の算定値に影響を及ぼし、茎表面の温度差  $\Delta T$  を用いると過大評価する結果となる。これは、日中の  $100 \text{ g h}^{-1}$  以上の高流量の場合、茎表面に設置した熱電対による温度測定では、茎内部の道管内の水輸送に基づく温度変化が正しく捉えられていないと考える。この図では、茎表面に比べて約1.3倍大きい温度差  $\Delta T'$  を式(8)の分母に用いることによって、従来法では過大評価した値を補正法では修正できる。

Fig. 6には、秤量法による蒸散量に対する (a) 表面温度差  $\Delta T$  と (b) 茎内部温度差  $\Delta T'$  の応答を示す。蒸散量の変化に対する茎温度差の応答は、理論的には、茎内流量が零の時は、温度差  $\Delta T = 0$  であり、茎内に流れが生じると温度差  $\Delta T$  は増加し、低流量のある時点で最大となり、その後次第に減少し、茎内流量が  $\infty$  で温度差  $\Delta T = 0$  に漸近する [1, 5]。本実験での茎表面と内部の温度差も概ね類似した応答を示している。また、蒸散量  $25 \text{ g h}^{-1}$  以上において、蒸散量の増加と共にヒータ上下の温度差は小さくなる傾向にある。前述のように茎表面と内部の温度差に相違があり、蒸散量  $150 \sim 200 \text{ g h}^{-1}$  では、Fig. 6(a)の茎表面の温度差  $\Delta T (= \text{約} 0.55^\circ\text{C})$  に比べて、Fig. 6(b)に示すように茎内部の温度差  $\Delta T'$  は約  $0.65^\circ\text{C}$  と大きくなっている。

蒸散量に対する温度差  $\Delta T'$  の応答の特徴として、本実験では、同一の蒸散量 (例えば  $50 \text{ g h}^{-1}$  のとき)

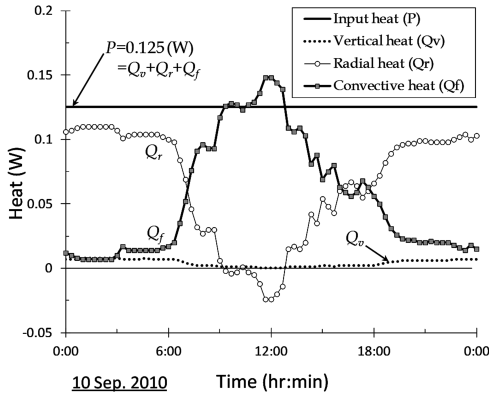


Figure 7. Diurnal change of the stem heat balance components on September 10, 2010 under constant heat input  $P$  (W); vertical  $Q_v$  and radial  $Q_r$  conductive heat (W), and heat carried by flowing sap,  $Q_f$  (W).

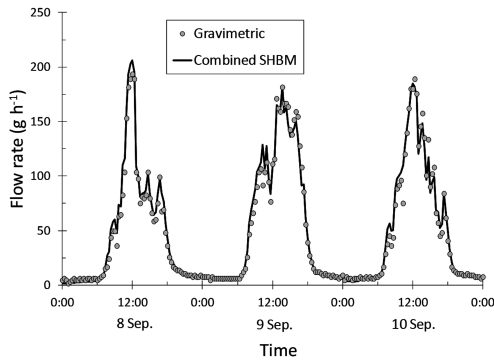


Figure 8. Comparison of sap flow rate by the stem heat balance method based on the stem-inside and the stem-surface temperature differences and gravimetric transpiration rate.

に対して、早朝から昼 (Fig. 6(b)の0:00-12:00) にかけて蒸散量が上昇するときの温度差 ( $\Delta T=1.5^\circ\text{C}$ ) に比べて、昼の蒸散量ピーク時から夕方 (Fig. 6(b)の12:00-24:00) にかけて蒸散量が低下する時の温度差 ( $\Delta T=1.0^\circ\text{C}$ ) が小さくなる。これは、早朝から昼にかけて蒸散量が上昇するときには、ポット内の土壌水の水温が低くヒータ上部の温度 $T_u$ との差が大きくなるが、気温の上昇と共に昼以降はポット内の土壌温度が上昇し、ヒータ上部の温度との差が小さくなるためと考える。

低流量時における補正法と秤量法との相違を解消し、かつ $100\text{g h}^{-1}$ 以上の高流量時における過大評価を修正するために、従来法と補正法を組み合わせる

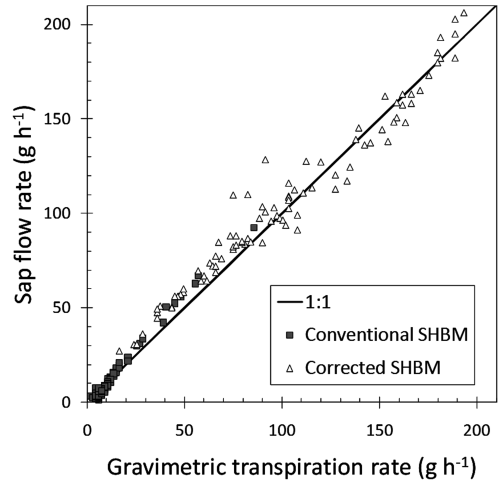


Figure 9. Relationship between sap flow rate by the combined stem heat balance method and the gravimetric transpiration rate.

方法を検討する。Fig. 7には、9月10日における式(1)の各熱収支項 $P$ 、 $Q_r$ 、 $Q_v$ 、 $Q_f$ の時間変化を示す。図中の $P$ は、ヒータにより与えた熱量であり、一定( $0.125\text{W}$ )である。茎内流により輸送される対流熱量 $Q_f$ と放射方向への損失熱量 $Q_r$ は、入力熱量 $P$ に占める割合が大きいが、そこで、対流熱量 $Q_f$ が損失熱量 $Q_r$ より卓越する $Q_f \geq Q_r$ の場合に茎内部温度差を用いる補正法を適用し、 $Q_f < Q_r$ の場合には従来法を適用する。この方法を、従来法と補正法の組み合わせ法とする。

Fig. 8に、組み合わせ法の結果を示す。組み合わせ法は、秤量法による蒸散量の時間変化をほぼよく再現している。また、Fig. 9に示すように、流量 $100\text{g h}^{-1}$ 以上では補正法による茎内流量と秤量法による蒸散量の関係は概ね1:1の関係にあり、一方、流量 $100\text{g h}^{-1}$ 以下では補正法と従来法の両者により1:1に近い関係が得られている。Fig. 9に示すデータ(総数217個)に対して、組み合わせ法での残差の標準偏差 (Root Mean Square Difference) [6]は $7.1\text{g h}^{-1}$ 、および相関係数は $0.992$ である。なお、従来法では、マニュアル[7]によれば、高流量時の上限値が与えられている領域である。

9月8日から10日の日単位の蒸散量について、秤量法と組み合わせ法の比較を行う。Table 1に、秤量法、組み合わせ法および従来法の蒸散量( $\text{g d}^{-1}$ )の結果を示す。組み合わせ法と秤量法との相違は8%以下であり、3日間の総計で約3%と極めて良い一致

Table 1. Daily transpiration rate measured by gravimetric method, the combined stem heat balance method and the conventional stem heat balance method.

Date	Gravimetric	Combined SHBM		Conventional SHBM	
	[g d <sup>-1</sup> ]	[g d <sup>-1</sup> ]	Difference [%]	[g d <sup>-1</sup> ]	Difference [%]
Sep. 8	1019	1097	8	1169	15
Sep. 9	1321	1331	1	1553	18
Sep. 10	1203	1229	2	1456	21
Total	3543	3657	3	4178	18

を得た。表に示すように、従来の茎熱収支法では日単位の蒸散量を約20%過大に評価する可能性があるが、組み合わせ法では、より高い精度で作物（ダイズ）の日蒸散量を求めることができる。

茎熱収支法は非破壊測定としての長所があり、多くの草本類や木本類の蒸散量の測定に利用されている。本研究で検討した組み合わせ法は、茎内部の温度差を測定することが必要となるため非破壊の長所を失うことになるが、高流量の過大評価を修正する方法として有効である。補正を加えるには、ヒータ加熱部上下の茎内部2ヶ所に新たに温度センサーを挿入する必要がある。本研究では、直径0.1mmの比較的径の小さい熱電対を用いることで、茎部に及ぼす影響を小さくするようにしている。

## 文 献

- [1] Gerdes, G., Allison, B. E. and Pereira, L. S.: Overestimation of soybean crop transpiration by sap flow measurements under field conditions in Central Portugal. *Irrigation Science*, 14, 135-139 (1994)
- [2] 竹内真一・初井和朗・矢野友久：茎内流測定に基づく作物蒸散量の測定。農業土木学会論文集, 186, 119-126 (1996)
- [3] Gordon, R., Dixon, M. A. and Brown, D. M.: Verification of sap flow by heat balance method on three potato cultivars. *Potato Research*, 40, 267-276 (1997)
- [4] Grime, V. L., Morison, J. I. L. and Simmonds, L. P.: Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74, 1-25 (1995)
- [5] Grime, V. L. and Sinclair, F. L.: Sources of error in stem heat balance sap flow measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94, 103-121 (1999)
- [6] 初井和朗・長勝史・伊藤祐二：池田湖の放射量の推定。鹿大農学術報告, 52, 1-8 (2002)
- [7] Dynamax Inc.: *Dynagauge installation and operation manual*. Dynamax Inc, Houston, Texas, USA, 90-91 (2005)  
Available: [ftp://ftp.dynamax.com/manuals/Dynagage\\_Manual.pdf](ftp://ftp.dynamax.com/manuals/Dynagage_Manual.pdf)

## Study on Sap Flow Rate Measurements by Stem Heat Balance Method

– Application to Soybean Crops –

Kazuro MOMII<sup>†</sup>, Tomoki SAKAGUCHI, Tomohide SHIMOTASHIRO,

Hiroki HIYAMA and Shin-ichi TAKEUCHI<sup>1)</sup>

(Laboratory of Water Use Engineering)

### Summary

The conventional stem heat balance (SHB) method based on the stem-surface temperature measurements correctly estimated the transpiration rate of soybean crops in a plastic pot measured using an electronic balance in cases of a sap flow rate less than  $100 \text{ g h}^{-1}$ . However the transpiration rate over  $100 \text{ g h}^{-1}$  was overestimated using the conventional SHB method. The corrected SHB method by the stem-inside temperatures instead of the stem-surface temperatures was applied when the convective heat,  $Q_c$ , by sap flow is greater than the conductive heat loss,  $Q_s$ , in the radial direction. The estimated sap flow rate using the corrected SHB method agrees well with the transpiration rate over  $100 \text{ g h}^{-1}$  obtained from the gravimetric measurements using the electronic balance. Thus, in this study, the combined SHB method, in which the conventional SHB method for  $Q_c < Q_s$  and the corrected SHB method for  $Q_c \geq Q_s$  are applied, was examined to measure the sap flow rate of the soybean crops. The root mean square difference between the hourly transpiration rate using the combined SHB method and the gravimetric method was  $7 \text{ g h}^{-1}$  and the correlation coefficient was 0.992. In the experiment investigating the daily transpiration rate of the soybean crop, the difference between the combined SHB method and the gravimetric method was within 3%, while the conventional SHB method overestimated by 20%.

**Key words:** Sap flow rate, Stem heat balance method, Transpiration, Soybean

<sup>†</sup>: Corresponding to : Kazuro MOMII (Laboratory of Water Use Engineering)

Tel: 099-285-8692, E-mail: momii@agri.kagoshima-u.ac.jp

<sup>1)</sup> present address : Faculty of Environmental Horticulture, Minami Kyushu University, 3764-1, Tateno, Miyakonojo, Miyazaki 885-0035, JAPAN