

茎熱収支法を基にした樹液流測定システムの開発

福岡 寛, 入口 大修*

Development of sap flow measurement system based on stem heat balance method

Hiroshi FUKUOKA, Taishu IRIGUCHI

本研究は茎熱収支法において茎内の樹液流を得るため、SHB センサーの開発を行った。また、レジナトマトの樹液流の挙動の観察を赤外線カメラおよびSHB センサーの茎表面温度を比較することにより確認する。その結果、樹液流の影響によりヒーター上で温められた温度が移動することが確認できた。そしてSHB センサーで得た茎表面温度より算出した樹液流量は一日を通して約 0.4 g/10min であることがわかった。

1. 緒言

近年、日本において高齢化に伴い農業に携わるものは年々減少している¹⁾。この理由は離農者が増加するのに対して新規就農者が減少しているからである。そのため早急に新規参入者を増やす必要があるがいくつかの問題が存在する。その一つとして、新規参入者は経験不足から育成状況に応じて最適な行動がとれないことである。この最適な行動とは、育成状況を確認する上で葉や茎などの色合いや成長の度合いを目視で行い、それに準じた育成ができないことである。

この問題を解決するために様々な技術が現在までに提案されてきた。その一つとして、植物の育成環境の情報をツールを使用することで収集および分析し、育成計画に活かすことである²⁾。これら育成環境の情報とは光合成量を増加させる要因とされる二酸化炭素、土壌の肥料濃度、水耕栽培の場合は培養液の肥料濃度の目安として用いられる EC 値および植物の病害に関係している飽差の算出で用いられる温度および湿度である。これら育成環境の情報は作物の品質安定化および栽培暦や農業日誌を記録する上で大いに役立ってきた。

しかし、この方法では生育環境の変化は解明できるが、植物の成長および生育環境の相関関係は評価できない。そのため植物の生育状況を定量的に測定し把握する方法が提案されている。それが茎中に流れる樹液流を計測することができる樹液流計測システムである。樹液流計測システムは植物内に流れる樹液流を計測する装置である。この樹液流計測システムは破壊型および非破壊型の計測方法が

存在する。破壊型計測法にはヒートパルス法³⁾およびグラニエ法⁴⁾が用いられる。これらの方法は木本植物に対し、ドリルなどの工具で穴を開け、ヒーターおよび温度センサーを樹幹部に挿入し樹液流を算出する。そのため、破壊型計測は植物に対して物理的な傷を与える。櫻谷はこの問題点を解決した非破壊型計測である、茎熱収支法 (Stem Heat Balance Method ; 以下 SHB 法と略す)⁵⁾を開発した。この計測法は茎の全周をヒーターで覆い熱の収支を計測することで茎断面の樹液流を非破壊で求めることができる。この SHB 法を基にして開発されたのが SHB センサーである。本センサーは、温度を高精度に測定する必要があるため、取り扱いが難しく、さらに最適な温度測定位置は明らかにされていない。

本研究では将来的に IoT を踏まえた安価かつ容易に行える SHB 法を基にした樹液流測定システムの開発を行う事を目的とする。そのために本実験では赤外線カメラにより茎表面の温度を求め、樹液流が茎表面の温度に与える影響を明らかにする。さらにここで得られた温度より熱の収支を求め、樹液流を算出し蒸散量との比較を行う。

2. 茎熱収支法の原理

図 1 に茎熱収支法の原理図を示す。茎熱収支法は、樹液流を算出するために熱を用いてヒーターにより茎へ加熱を行う。ヒーターにより加熱された熱量 Q は図 1 に示すように熱伝達 Q_f により対流方向へ熱が運ばれる。また、熱伝導により上方 Q_u および下方 Q_d へ熱が伝わり、ヒーター背面から空気中へ熱 Q_r がにげる。これら与えた熱量

* システム創成工学専攻 機械制御システムコース

と出ていく熱量の収支を式で表すと (1) 式となる。

$$Q = Q_r + Q_u + Q_d + Q_f \quad (1)$$

図2に茎およびSHBセンサーの概略図を示す。図に示すように茎内外の熱の収支を測定するためにSHBセンサーは6点の熱電対、ヒーターおよび断熱材のコルクにより構成されている。このヒーターに電圧 E [V] を加えると、熱量 Q [W] が発生する。(1) 式の熱伝達によって運ばれる熱量 Q_f [W] はニュートンの冷却法則により算出する。茎の熱伝導によって上方および下方に運ばれる熱量 Q_u [W] および Q_d [W] はフーリエの法則により算出することができる。ヒーター背面から周囲の空气中へ失われる熱量 Q_r [W] である。 Q , Q_f , Q_u , Q_d および Q_r は次式で与えられる。

$$Q = EI \quad (2)$$

$$Q_f = C_w F (T_u - T_d) \quad (3)$$

$$Q_u = \lambda A \frac{T_u - T_u'}{\Delta x} \quad (4)$$

$$Q_d = \lambda A \frac{T_d - T_d'}{\Delta x} \quad (5)$$

$$Q_r = kE \quad (6)$$

ここで、 E , I , C_w , F , λ および A はヒーターに加え

る電圧 [V], ヒーターに流れる電流 [A], 水の比熱 [J/g・K], 茎内流量 [g/s], 茎の熱伝導率 [W/m・K], 茎の横断面積 [m²] を示す。 T_u' は T_u の測温点より Δx [m] 離れた上方の茎温 [K], T_d' は T_d の測温点より Δx [m] 離れた下方の茎温 [K] である。また、 Q_r はヒーター背面に装着した熱流素子の起電力 E [V] とセンサー係数 k [W/V] から求めることができる。(1) ~ (6) 式より茎内流量 F は次式で表される。

$$F = \frac{Q - \lambda A \left(\frac{(T_u - T_u') + (T_d - T_d')}{\Delta x} \right) - kE}{C_w (T_u - T_d)} \quad (7)$$

草木植物の茎伝導率は文献⁶⁾より 0.54 [W/m・K] を採用した。各温度差、 $T_u - T_u'$, $T_d - T_d'$, $T_u - T_d$, および E を求めることによって F を算出することができる。なお、各温度差は熱電対により測定する。

また、茎背面からの熱量 Q_r は夜間(日の出前)に流量 $F = 0$ と仮定して算出する⁵⁾。その熱量を求める式は (8) 式となる。

$$Q_r = EI - \lambda A \left(\frac{(T_u - T_u') + (T_d - T_d')}{\Delta x} \right) \quad (8)$$

3. 実験装置および方法

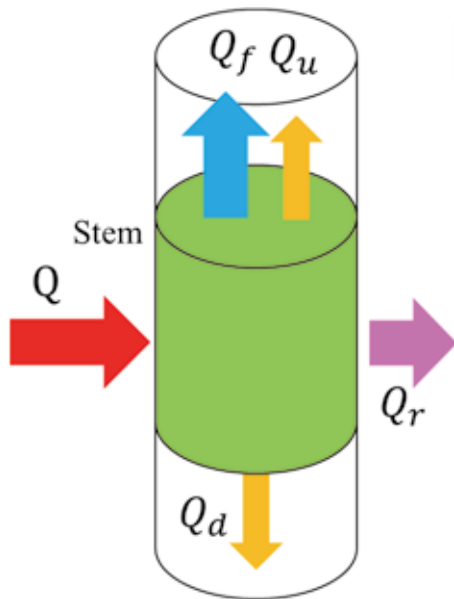


Fig.1 Principle of SHB method

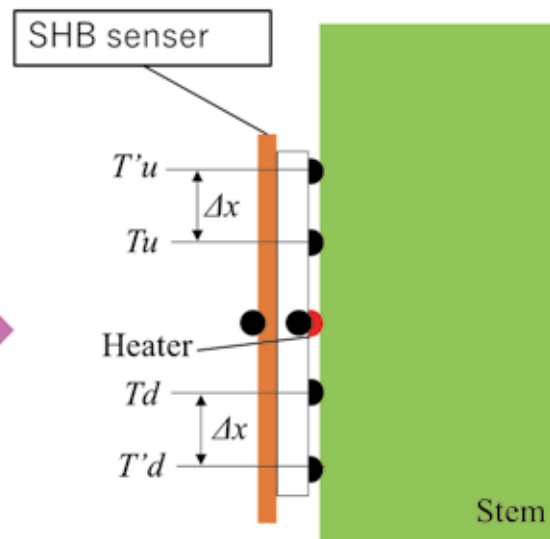


Fig.2 Side-view of position of thermocouples and heaters

3.1 実験概要

図3に本実験で使用した実験装置全体の概略図を示す。本実験の目的は茎中に流れる樹液流が茎表面温度に与える影響を調べることである。そのため茎表面温度を広範囲に計測することができる赤外線カメラおよび継続的に計測が可能である熱電対に着目した。本実験で使用した植物は土壌栽培で育成したレジナトマトである。レジナトマト

は外乱による影響を取りのぞくために小型実験室で実験を行う。小型実験室はメタルラックを基礎とし、風による植物への影響を防ぐために、ビニールシートでメタルラック全体を覆う。また、ビニールシートは外部からの光を遮断させるために内側に銀薄膜のアルミテープを張る。小型実験室における夜間および昼間の日照条件の変更はLEDを用いることで行う。LEDはAM 2時に消えAM 10時に付くように設定を行う。SHBセンサーによる流量の確か

さは植物の蒸散量と比較することで行う。植物の蒸散量は Web カメラで電子秤を 10 分ごとに撮影することで確認した。また、蒸散量計測の誤差となる鉢からの蒸発は、ビニールシートを鉢に被せることによって防ぐ。赤外線カメラ

を用いて植物の茎表面温度を計測した時および SHB センサーで計測した時の測定環境は同じである。

3.2 赤外線カメラを用いた茎表面温度測定

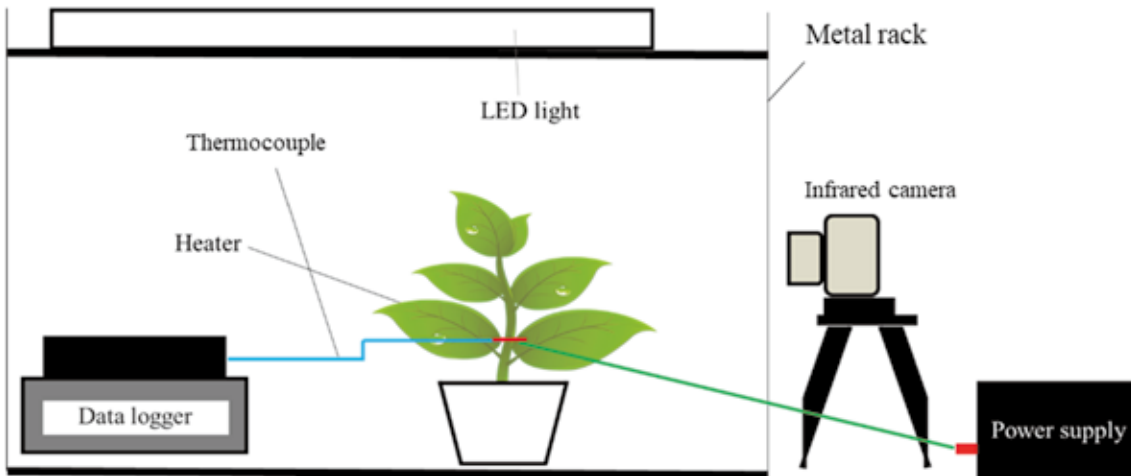


Fig.3 Structure of experimental environment

本実験は樹液流による茎表面温度への影響を調べるために赤外線カメラを用いて広範囲に計測を行う。熱源であるヒーターはレジントマトの茎外周を一巻きし加熱を行う。また、絶縁テープは茎およびヒーターの密着性を高めるためにヒーターの上部から巻き付ける。ヒーターは直径 0.5 mm のニクロム線を使用し、直流安定化電源より約 40°C になるように加熱を行う。この温度設定は植物を構成しているタンパク質の硬化を防ぐためである。茎表面温度はヒーターを巻き付けた茎に赤外線カメラでピントを調整し撮影することで行った。撮影時間は撮影開始を $t = 0s$ としヒーターをつけてから $t = 600s$ で終了とする。また、装着部の茎直径は 8 mm である。

出する。SHB センサーに使用した熱電対は K 型熱電対のアルメル、クロメルを用いた。ヒーターは直径 0.5 mm のニクロム線を用い、直流安定化電源で約 40°C になるように加熱する。また、ヒーター温度はヒーター表面に熱電対を 1 点装着し、計測する。センサーの構成はコルクを基にし、茎との密着性を上げるためにスポンジを用いる。SHB センサーは茎およびスポンジの間に、空気の層ができないように密着させ巻き付ける。またセンサー寸法は図 4 に示した通りである。熱電対で計測した値はデータロガーに 10 分間隔で収録を行う。熱電対装着部の茎直径は赤外線カメラで計測した茎直径と同じ 8 mm を用いた。表 1 に樹液流算出時に使用したパラメータを示す。表 1 の A, dx, Q, λ , Cw および K は茎の横断面積 [m²], センサー上にある熱電対から熱電対の間隔 [m], ヒーターから茎に加えた熱量 [W], 茎の熱伝導率 [W/m·K], 比熱 [J/g·K] およびセンサー係数 [W/V] を示す。

3.3 SHB センサーを用いた茎表面温度測定

本実験は樹液流による茎表面温度への影響を調べるために長時間計測可能である熱電対を用いて実験を行う。また、熱電対により計測した茎表面温度を用いて樹液流を算

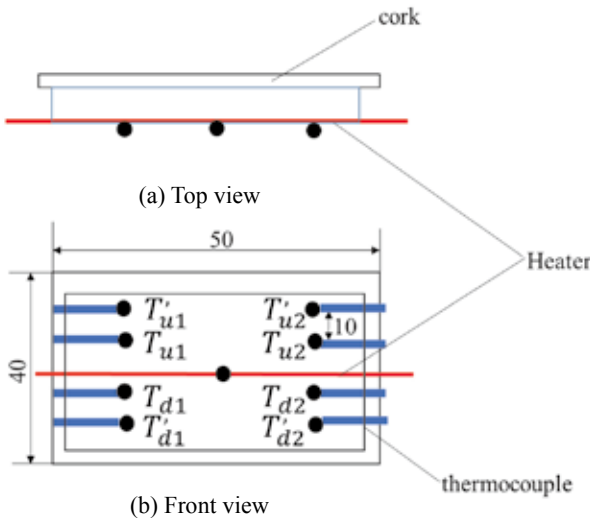


Table 1. Value of Parameters

Parameters	Value
A (m ²)	0.00006317
dx (m)	0.01
Q (W)	0.858
λ (W/m·K)	0.54
Cw (J/g·K)	4.186
K (W/V)	1.37

Fig.4 Structure of position of thermocouples and heaters

4. 結果および考察

4.1 赤外線カメラを用いた茎の温度分布

図5は明室における、茎全体の温度の時間変化を示している。図5は下部が根、上部が葉になっており、ヒーター加熱部をゼロ点とした位置を表す。図5の $t = 0$ sはヒーターの加熱開始を示し、 $t = 10$ sにおいて温度の上昇が確認できる。また、(d)までは上下対象に熱が伝わっているのがわかる。そのため時間の経過と共に温度が茎上部に伝わっていくのが確認できる。図(c)から(f)にかけてヒーター下部にも温度の変化がみられる。このことからヒーター熱は茎に伝導しているのがわかる。これらのことより、ヒーター上部と下部では温度の上昇幅が異なり樹液流による影響があると考えられる。

上述よりヒーターにより加熱された茎の温度上昇部は、加熱部の上下に広がり、一定時間経過後葉の方向へ広がることがわかった。さらに詳細な温度分布の時間経過を調べるために図6に茎の中心軸の温度履歴を示す。これは赤外線カメラで図5のように撮影した植物の温度を、図5(f)に

示す破線部分で600枚重ね合わせた図である。図6の縦軸および横軸はヒーター部をゼロ点とした茎上の距離および加熱開始からの時間経過を示している。図6より横軸 $t = 0$ sから $t = 600$ sにかけてヒーター上部は一定に温度が上昇しているのに対し、ヒーター下部は温度が横ばいになっている。これは対流の効果によってヒーター上で温められた樹液流が上部に流れたためである。また、ヒーターより下部の温度が横ばいになるのは、ヒーターから茎への熱伝導が樹液流により押し上げられたためである。

明室においてヒーターにより加熱された温度は、樹液流による熱伝達の影響を受けることがわかった。次に光の明暗により樹液流が温度分布に与える影響を調べるために図7に明室および暗室の温度履歴を示す。横軸の $t = 0$ sから $t = 600$ sにかけて、図7(a)のヒーター下部では温度が横ばいであるのに対し図7(b)のヒーター下部では一定に温度が広がっていることがわかる。この理由として、暗室における樹液流は明室に比べて流れが減少したためである。ゆえに、対流による影響が少なく熱伝導が支配的となり温度幅が変化したと考えられる。

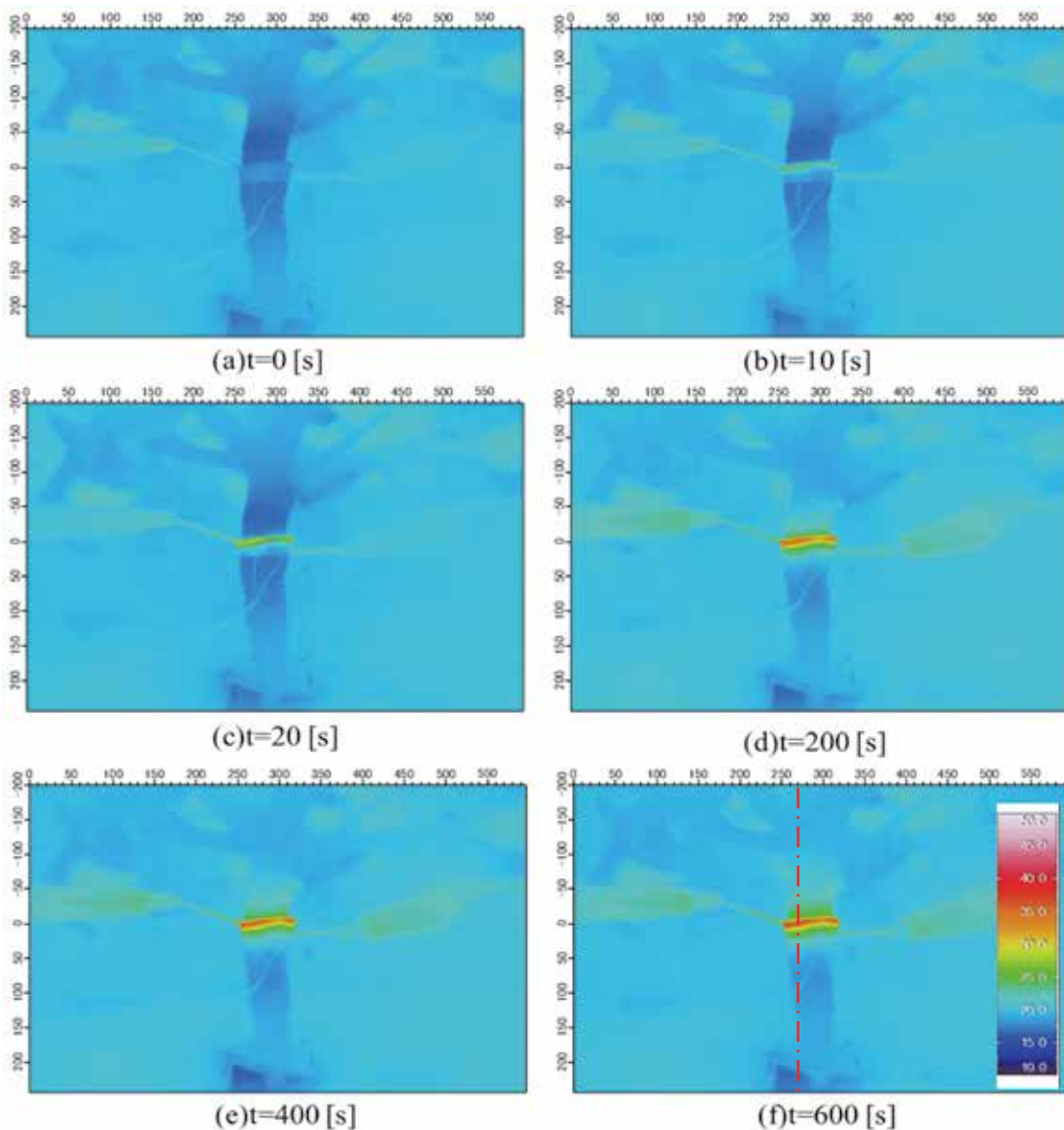


Fig.5 Temperature distribution of stem

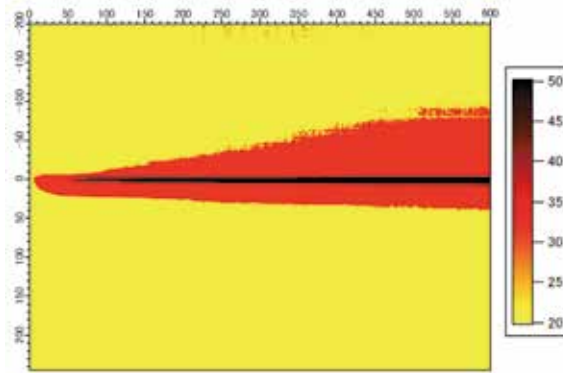
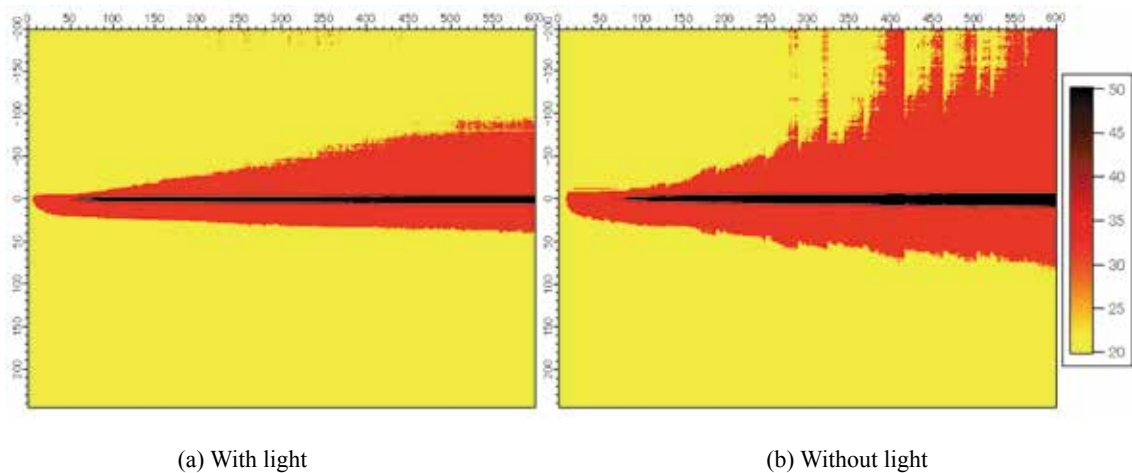


Fig.6 Time history of temperature distribution



(a) With light

(b) Without light

Fig.7 Comparison of temperature distribution by brightness

4.2 熱電対による光の明暗が温度分布に与える影響

赤外線カメラでは短時間の計測しかできないため、1日の計測ができる熱電対およびデータロガーを用い、茎線上の温度分布を確認する。図8は熱電対より得た時間変化に対する温度変化を表す。破線、一点鎖線、二点鎖線、点線および実線はそれぞれ Tu' 、 Tu 、 Td 、 Td' およびヒーター部の温度を示す。時間 $t = 0$ s は加熱開始から十分に時間が経過した後とした。また暗室は 560 -1050min の間でありそれ以外は明室となる。明室および暗室において実線はヒーター加熱部を示すため温度が一番高温となる。次に高いのはヒーターに近い Tu である。また、センサー間距離が等しい Tu および Td の温度が等しくないのは樹液流が下から上に流れるためである。そのため明室および暗室において樹液流は流れていることが確認できた。

明室および暗室において樹液流は、茎表面の温度分布を確認することで流れていることがわかった。次に、図9は暗室および明室の茎表面の温度分布において何が支配的なかを明らかにするために、茎表面の温度分布を示す。黒色実線および赤色実線はそれぞれ明室および暗室の温度を示す。横軸および縦軸は茎表面の温度およびヒーターの位置をゼロとした距離を示す。暗室におけるヒーター下部に位置する Td および Td' の温度は明室の温度より高い値を示している。このことから暗室における Td および Td' の温度は明室に比べ熱伝達の影響が少なくヒーター下部へ熱が伝導し高温となる。ゆえに、暗室において対

流による影響は少なく熱伝導が支配的であると考えられる。以上より熱電対でも赤外線カメラと同様の現象が確認できた。

図10より樹液流は、明暗にかかわらずほぼ $0.4\text{g}/10\text{min}$ で一定となった。これは、明暗の温度差がほとんどなかったためだと考えられる。また、蒸散流量は時間毎に大きなばらつきはあるものの、おおむね樹液流量と同じ値を示していることがわかる。このことから、本実験において作成したSHBセンサーによる樹液流量はおおむね確かであると考えられる。

5. 結論

本研究では、茎熱収支法を用いたSHBセンサー開発のための基本的なデータとして茎の温度分布を赤外線カメラおよび熱電対を用いて測定した。赤外線カメラでは茎全体の温度分布を測定し、ヒーター加熱後の茎の温度変化を確認した。ヒーター加熱による温度上昇は、流れ方向に対して非対称になることが確認できた。これは樹液流の流れによって熱が葉の方向に運ばれたからだと考えられる。また、熱電対は、赤外線カメラでは観察できない長時間の温度変化を確認した。ここで得られた温度からも、樹液流による温度分布の変化が確認できた。熱電対から得られた熱の収支を解くことで樹液流量を算出した。算出した値が蒸散量とおおむね一致したことが確認できた。

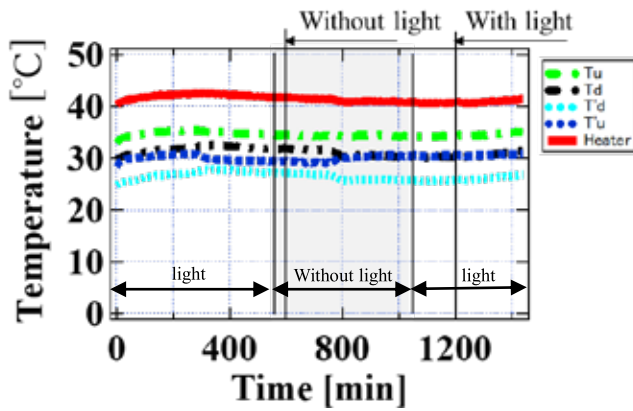


Fig.8 Relation between temperature and time

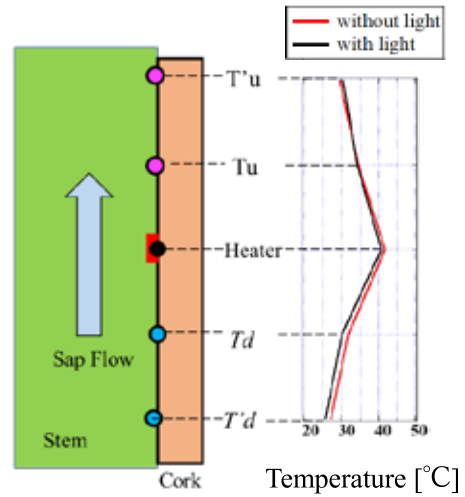


Fig.9 Temperature distribution on stem surface

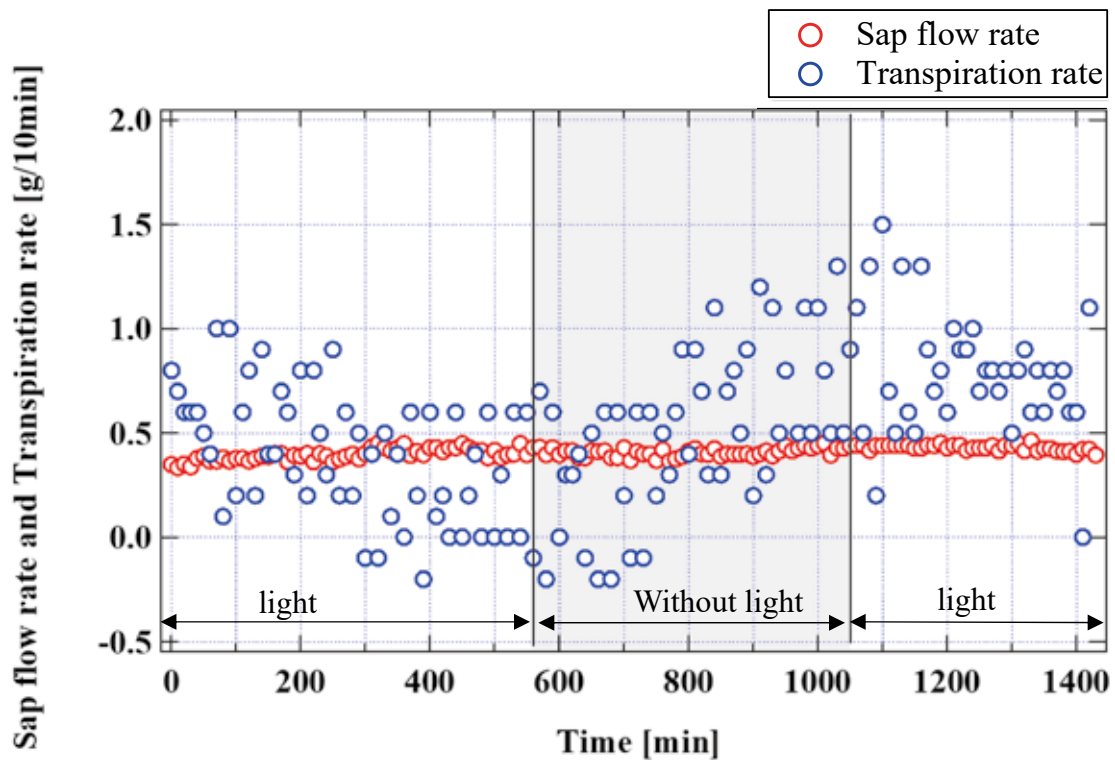


Fig.10 Time history of Sap flow rate and Transpiration rate

参考文献

- (1) 山下一仁, 農業を魅力ある就業先とするために, 日本労働研究雑誌, No.675, pp.1-3. (2016)
- (2) 書良芳夫, 白井清恒, 蒸発散量と気象諸因子との関係, 農業土木学会論文集 38, 7-12 (1971)
- (3) Y. Cohen, M. Fuchs and G.C. Green: Improvement of the heat-pulse method for determining sap flow in trees, Plant Cell Environ, 4, 391/397 (1981)
- (4) A. Granier: Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans letronc des arbres, Annales des Sciences Forestieres, 42, 193/200 (1985)
- (5) T. Sakuratani: A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants, J. Agric. Meteorol., 37, 9/17 (1981)
- (6) T. Sakuratani: Apparent thermal conductivity of rice stems in relation to transpiration stream. Jpn. J. Agric. Meteorol., 34(4), 177-187 (1979)