

# 簡易式気孔コンダクタンス測定装置 (DECAGON, SC-1) による 測定精度の検証

田中 (小田) あゆみ (東大院新領域)・田中憲蔵 (森林総研)・  
赤見亜衣・神保克明・森田敏充・福田健二 (東大院新領域)

**要旨:** 簡易式の気孔コンダクタンス測定装置(DECAGON, SC-1)は、小型で持ち運びが容易で野外測定に有用であるが、日本の高湿度環境下での測定や、常緑樹など気孔コンダクタンスが低い場合の測定精度は不明であった。そこで、異なる湿度環境下(RH = 45%と 65%)において様々な植物の気孔コンダクタンスを SC-1 で測定し、高精度な LI-COR 社の携帯式光合成蒸散測定装置(LI-6400)の測定結果と比較することで、SC-1 の測定精度を検討した。その結果、SC-1 の測定値は LI-6400 と有意な相関関係があったが( $r^2 > 0.4$ )、湿度の影響を強く受けており、湿度が高い環境(RH = 65%)では LI-6400 より低いコンダクタンス値を示した。また、LI-6400 で測定した気孔コンダクタンス値が  $0.4 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  を超える場合には、SC-1 の測定値が相対的に低くなり、気孔コンダクタンスを過小評価する可能性があると考えられた。高湿度環境下での測定や気孔コンダクタンスが高い植物を SC-1 で測定する場合は、サンプルや測定環境の湿度管理や繰り返し回数を増やすなどの対策が必要である。

**キーワード:** SC-1, LI-6400, 気孔コンダクタンス, 湿度

**Abstract:** Stomatal conductance ( $g_s$ ) is an important factor to determine the plant ecophysiological characteristics such as drought tolerance and stomatal sensitivity. SC-1 leaf porometer is a handy equipment convenient to measure  $g_s$  in the field. However, this equipment was developed in Europe and little studies have been done on its accuracy of measurement in Japanese plant species or under humid climate of Japan. We compared the values of  $g_s$  measured by SC-1 porometer with those by infrared gas analyzer LI-6400 under different air humidity conditions (RH = 45% and 65%). Stomatal conductance measured by SC-1 significantly correlated with the values by LI-6400 ( $r^2 > 0.4$ ), however, under humid condition (RH = 65%) the values significantly lower than those by LI-6400. Moreover, there was great variability of  $g_s$  appeared when we measured leaves with high conductance ( $g_s > 0.4 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). We conclude that the  $g_s$  values measured by SC-1 porometer can be significantly influenced by air humidity and it can underestimate under high humidity condition and/or leaves with high  $g_s$ .

**Key words:** SC-1, LI-6400, Stomatal conductance, humidity

## I はじめに

植物は葉の裏に主に存在する気孔を通じて光合成に必要な  $\text{CO}_2$  の取り込みや蒸散を行っている(12)。気孔開閉は環境要因などでコントロールされ、ガス交換速度や蒸散速度を制御している(5,6)。気孔開度が大きくなれば  $\text{CO}_2$  の取り込み速度が増加するが、一方で蒸散により失われる水分量が増加する。気孔開度は植物の生理状態を知るために有効な指標であり(5)、生理特性の解明(7)、耐乾性評価(4,3,9,10,11,14)や大気汚染物質の影響評価(2)、作物の分野(1,8,13,15)など様々な研究に用いられている。

気孔コンダクタンス( $g_s$ )はガス拡散に対する気孔抵抗の逆数として定義され、気孔開度の指標である(5,6)。通

常、気孔コンダクタンスは葉から出る水蒸気分圧の変化を測定することで表わされる。測定手法は主に2種類あり、一つは水蒸気を一定に調整した空気を同化箱に送り込み、植物の蒸散により増加した水蒸気量の変化を赤外線ガス分光光度計で測定し、気孔コンダクタンスを計算する方法で、主に Delta-T 社の AP-4 や LI-COR 社の LI-6400 などに用いられている(5)。この手法は測定精度が高い代わりに、機器が高価である。

それに対し、DECAGON 社から発売された SC-1 リーフポロメーターは、リーフクリップ内に上下に並んだ二つの湿度センサーを持ち、葉をチャンパーに挟んだ時にセンサー間に出来る湿度勾配から気孔コンダクタンスを

TANAKA-ODA Ayumi, AKAMI Ai, JIMBO Katsuaki, MORITA Toshimitsu, FUKUDA Kenji (Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo, Kashiwa 277-8563 Japan), TANAKA Kenzo (FFPRI., Tsukuba 305-8687 Japan) Comparison of stomatal conductance values between SC-1 (DECAGON) and LI-6400 (LI-COR).

算出する(図-1)。このため、構造が単純で機器が小型軽量なため持ち運びに便利であり、他の機種に比べて安価である。しかし、高湿度環境下ではセンサー間の湿度勾配が小さくなり検出力が低下すること、1回の測定時間が30秒に設定されており、湿度勾配が平衡に達するのに十分な時間であるかが懸念される。日本の夏のような高湿度環境下で測定感度が低下する可能性、低い気孔コンダクタンスを示すことの多い常緑樹などへ適用可能性、また測定方法(繰り返しの回数や安定時間など)の詳しい検証などはおこなわれていない。SC-1にはオート測定のほか、ユーザー側で測定の終了時間を設定できるマニュアル測定機能があり、キャリブレーションや特殊な測定に対応できるようになっている。そこで、異なる湿度環境下において、従来気孔コンダクタンスの測定に用いられているLI-6400と測定値の比較を行うことで最適な測定手法と測定精度を明らかにすることを目的として、多様な植物、測定条件下での測定を行った。

## II 材料と方法

測定は東京大学千葉演習林と柏キャンパス周辺で行った。様々な気孔コンダクタンスを測定するため、落葉樹種として、アカメガシワ、アオギリ、アオダモ、アブラチャン、イヌウメモドキ、イヌシデ、エンジュ、キンモクセイ、ケヤキ、コナラ、サクラ、ヌルデ、ムクノキを、常緑樹種として、クスノキ、シラカシ、シロダモ、ツツジ、ツバキ、ニシキギ、ネズミモチ、バリバリノキ、マサキ、モッコクを選定した。また、草本種として、アレチナス、ギシギシ、キツタ、ハラン、ヘラオオバコを選定し測定した。

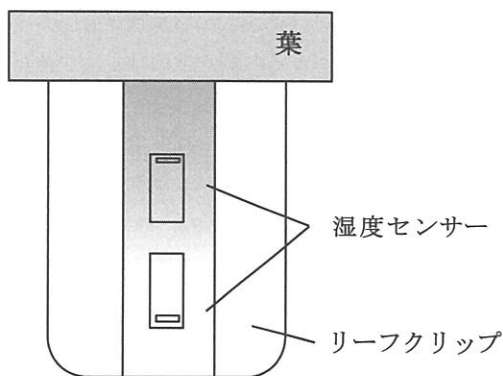


図-1. SC-1リーフクリップの構造の模式図

Fig.1 Structure of SC-1 leaf clip

## III 結果と考察

**1. SC-1とLI-6400の測定値の関係** SC-1とLI-6400の測定値には高い相関関係があったが、SC-1の測定値は湿度により異なり、湿度が高いほどLI-6400より低い値を示した(図-2)。湿度65%の環境下では、LI-6400で測定した気孔コンダクタンスに対するSC-1のコンダクタンス値における回帰直線の傾きが0.42であったのに対し、湿度40%では1.72を示した。湿度が高い環境ではSC-1の湿度センサー間の勾配が小さくなり、気孔コンダクタンスを過小評価する可能性が高いと考えられた。

また、湿度がほぼ同じ一日の中でも、気温の変化などにより気孔コンダクタンスの値が変化すると考えられるため、8月18日の午前8時と午後12時にそれぞれ同じ葉を測定した(図-3)。測定を行った日は曇天日であり、LI-6400で測定した気孔コンダクタンスの値は午前も午後もほぼ変化しなかったが、午後12時に測定したSC-1の測定値、相関係数とも午前より高かった。日中の気温上昇により大気の水蒸気飽差(VPD)は午前8時の約1.5から午後12時には約2.0へと増加しており、蒸散速度も増加していた。これら温度、蒸散速度、VPDも湿度変化と併せてSC-1の測定値に影響を与えている可能性が考えられた。

**2. オート測定とマニュアル測定の違い** オート測定とマニュアル測定で気孔コンダクタンスの測定値が大きく異なることが分かった。湿度65%でのマニュアル測定ではLI-6400との相関関係が得られなかった(データ未表示,  $p > 0.05$ )。湿度40%で測定したところ、オート測定ではLI-6400で測定した気孔コンダクタンスが0.4を超えるとSC-1の値がLI-6400の値に比べて低くなった(図-4)。この理由として、蒸散速度が高い場合には湿度センサー間の湿度勾配が緩やかになり、検出力が低下することが考えられた。一方、マニュアル測定では常にLI-6400よりも低い値を示すが、オート測定よりも高いコンダクタンス域でも値のばらつきが小さく相関も高かった。マニュアル測定では、数値の安定までの時間が1分30秒から2分程度とオート測定の30秒より長くなった。このことから、高いコンダクタンスを示す植物でオート測定を行うとコンダクタンスの過小評価に繋がる可能性があり、気孔コンダクタンスが0.3-0.4以上の植物についてはマニュアル測定を併用するか、コンダクタンス値を補正する必要があると考えられた。

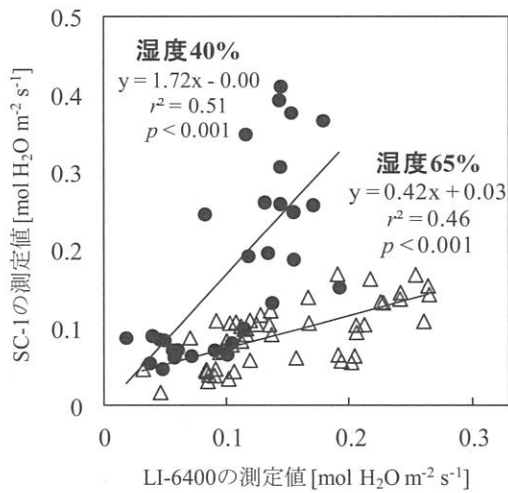


図-2. 異なる湿度環境下において SC-1 と LI-6400 で測定した気孔コンダクタンス値の関係

Fig.2 Relation between stomatal conductance measured by SC-1 and LI-6400 under different humidity condition (RH = 65% and 40%)

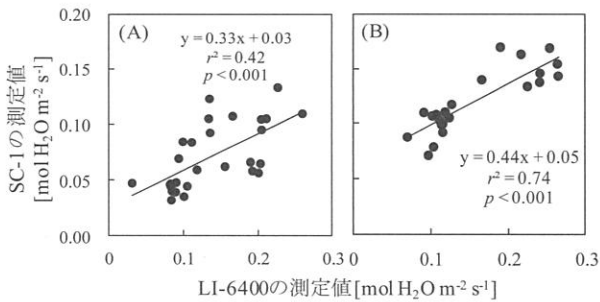


図-3. 午前と午後の SC-1 測定値の違い

Fig.3 Relationships between stomatal conductance measured by SC-1 and by LI-6400 at 8:00am (A) and 12:00pm (B)

IV おわりに

以上の結果から、SC-1 の測定値は信頼性の高い LI-6400 の測定値と高い相関を示す一方で、湿度や温度、蒸散速度など測定時の気象条件の影響を強く受けることが明らかになった。今回の測定では、SC-1 の測定値は大気湿度が低いほど高い値を示し、高湿度環境では気孔コンダクタンスを過小評価する傾向がみられた。そのため、正確な測定にはサンプルや機器の湿度管理が重要であると考えられた。安定した測定を行う方法として、SC-1 のリーフクリップを測定毎にシリカゲルなどを封入して水蒸気を取り除いた袋に入れ、湿度センサー周辺の水分を取り除いてから測定することが有効かも知れない。また

植物種ごとに湿度や温度が測定値に与える影響を詳しく調べ、測定時の湿度による補正式を作成することなどが考えられた。

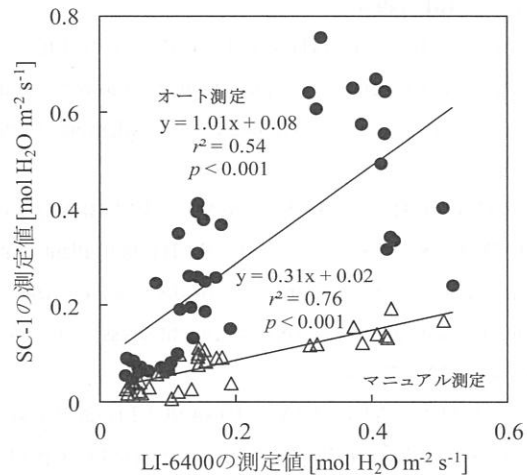


図-4. オート測定とマニュアル測定の違い

Fig.4 Relation between stomatal conductance measured by SC-1 and LI-6400 at auto mode and manual mode

引用文献

(1) CABRERA-BOSQUET L, SA'NCHEZ C, ARAUS JL (2009) How yield relates to ash content, D<sup>13</sup>C and D<sup>18</sup>O in maize grown under different water regimes. *Annals of Bot.* 104: 1207-1216

(2) FREI M, TANAKA JP, WISSUWA M (2008) Genotypic variation in tolerance to elevated ozone in rice: dissection of distinct genetic factors linked to tolerance mechanisms. *J. Exp. Bot.* 59: 3741-3752

(3) GIORDANO CV, GUEVARA A, BOCCALANDRO HE, SARTOR C, VILLAGRA PE (2010) Water status, drought responses, and growth of *Prosopis flexuosa* trees with different access to the water table in a warm South American desert. *Plant Ecology* 212: 1123-1134

(4) KENZO T, YONEDAR, AZANI MA, MAJID NM. (2008) Changes in leaf water use after removal of leaf lower surface hairs on *Mallotus macrostachyus* (Euphorbiaceae) in a tropical secondary forest in Malaysia. *J. For. Res.* 13: 137-142.

(5) LAMBERS H, CHAPIN III FS, PONS TL (1998) *Plant physiological ecology.* Springer-Verlag, New York.

- (6) LARCHER, W. (2003) *Physiological Plant Ecology*. 4th Edn. 513 pp. Springer-Verlag, New York.
- (7) LIMM EB, SIMONIN KA, BOTHMAN AG, DAWSON TE (2009) Foliar water uptake: a common water acquisition strategy for plants of the redwood forest. *Oecologia* **161**: 449-459
- (8) LOKA DA, OOSTERHUIS DM (2010) Effect of 1-Methylcyclopropene on the Cotton Flower Under Water-Deficit Stress. *Summaries of Arkansas Cotton Research*. 66-71
- (9) MAESA WH, ACHTENA WMJ, REUBENSA B, RAESB D, SAMSONC R, MUYSAB (2009) Plant-water relationships and growth strategies of *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. *J. Arid Environ.* **73**: 877-884
- (10) NAKAIA, YURUGI Y, KISANUKI H (2010) Stress responses in *Salix gracilistyla* cuttings subjected to repetitive alternate flooding and drought. *Trees* **24**: 1087-1095
- (11) PFAUTSCH S, KEITEL C, TURNBULL TL, BRAIMBRIDGE MJ, WRIGHT TE, SIMPSON RR, O'BRIEN JA, ADAMS MA (2011) Diurnal patterns of water use in *Eucalyptus victrix* indicate pronounced desiccation-rehydration cycles despite unlimited water supply. *Tree Physiology* **31**: 1041-1051
- (12) TAIZ L, ZEIGER E (2002) *Plant physiology*. Third Edition. Sinauer Associates Inc.
- (13) TANAKA Y, SHIRAIWA T, NAKAJIMAA, SATO J, NAKAZAKI T (2008) Leaf gas exchange activity in soybean as related to leaf traits and stem growth habit. *Crop Science* **48**: 1925-1932
- (14) SAGARDOY R, VÁZQUEZ S, FLOREZ-SARASA ID, ALBACETE A, RIBAS-CARBÓ M, FLEXAS J, ABADÍA J, MORALES F (2010) Stomatal and mesophyll conductances to CO<sub>2</sub> are the main limitations to photosynthesis in sugar beet (*Beta vulgaris*) plants grown with excess zinc. *New Phytol.* **187**: 145-158
- (15) ZHANG H, MAO X, JING R, CHANG X, XIE H (2011) Characterization of a common wheat (*Triticum aestivum* L.) TaSnRK2.7 gene involved in abiotic stress responses. *J. Exp. Bot.* **62**: 975-988