

サイクロメータによる葉の水分ポテンシャルの測定

松田 松二, 浅沼 興一郎, 山田 宣良

I ま え が き

近年、わが国でも畑地基盤整備事業の一環として畑地かんがい積極的に推進されはじめ、特にかんがい施設の多目的利用や自動化等の面ではめざましい進展をとげてきている。しかしながら、畑地かんがいの本来の目的が作物の生育環境、特に土壤水分を作物の生育上適正な状態に保つことにある以上、かんがいの時期、水量、方法等、実際にかんがいを行なう場合に基本となる事項を合理的に決定する際には、この点を十分に考慮する必要がある。これらの基本的事項を決定するにあたり、これまでは気温、蒸発量といった接地気象的要因や、土壤水分張力の変化のような土壤物理的要因が指標とされていたが、いずれも対象となっている作物からみれば間接的なものであり、その意味において、我々はこの場合の直接的な指標となりうるものとして、作物の水分生理的な要因についても配慮すべきではないかと考えている。具体的には作物体の水分ポテンシャルの変動を実測することにより、作物の生育状況や他の間接的要因との関連の下に、かんがいの実施を決定するのがより合理的なものとなるであろうし、また基礎的な事柄としても、水分ポテンシャルの測定を通じて作物の水分生理を物理的にとらえることは、意義あるものと考えられる。

II 植物体の水分ポテンシャルの測定について

植物体（主として葉）の水分ポテンシャルを野外で測定するにはいくつかの方法があるが、測定上の制約条件を伴う場合が多く、実用上は目的に応じて選定されているのが現状のようである。それらのうち、原理的にも確立しており、しかも比較的簡便な方法としては、1. Pressure chamber method, 2. Dye method および 3. Psychrometric method があげられる。

まず、Pressure chamber method は、試料として採取した葉に圧力を加え、細胞液が浸出した時点を平衡圧力として水分ポテンシャルを測定する方法である。従って平衡時の判定に際して、若干客観性が失なわれる恐れはあるが、信頼性の高い測定法として欧米では広く用いられている。この方法によって得られた測定値については、後述するサイクロメータによる測定結果とよく一致した（相関係数 $r=0.957$ ）という報告もあるが⁽²⁾、原理的にみれば、細胞液を搾り出すという形態をとっている以上、実際の値よりもやや低いポテンシャル値を示す傾向は否定できないようである⁽⁴⁾。

次に Dye method は、試料をあらかじめポテンシャルを定めた塩類等の溶液に入れ、浸透圧の差によって試料が委調する時点を平衡水分ポテンシャルとする方法であり、ここで論述している三種の中では最も簡便な方法であるといえる。しかしながら、標準液のポテンシャル値の定め方や、委調時の判定法に伴う誤差がやや大きく、1~5bar 程度にも及ぶのが欠点である⁽⁶⁾。

更に Psychrometric method についてみると、この方法は試料の水分ポテンシャルと平衡した水蒸気圧を測定する、蒸気圧法の原理に基づいた測定法であり、計測時において主観的要因が全く入らないのが特徴である。欠点としては、平衡状態に達するのに長時間を要することと、温度の影響を受けやすいことがあげられる。

このように、これらの方法にはそれぞれ一長一短があるが、従来、わが国ではほとんど試験的段階を出なかったのに先がけ、最近 U. S. A. WESCOR 社製サイクロメータが市販されたので、我々はまずこの方法による測定結果を応用に供せんものと試みた。

サイクロメータによる水分ポテンシャルの測定については、既に20年以上も前にその原理的可能性や測定上の問題点が適確に指摘されており⁽¹²⁾ その後の研究は主として現場での適用性の検討や、機器の構造的改良にむけられているようである。一般に測定範囲は pF に換算して3~5程度と考えられ、この点からみると植物体の水分ポテンシャルの測定にも充分適用しうるようである。原理的には次式に基づいている。

$$\phi = \frac{(\mu - \mu_0)}{V} = RT \ln \frac{(p/p_0)}{V}$$

- 但し T: 絶対温度
- V: モル体積
- R: 気体定数
- p: 水蒸気圧

実際の測定においては、試料を断熱容器（ナイロン製）に入れ、容器内の気温と露点温との差を熱電対で求めている。この際の冷却は Peltier 効果によって電気的に行なわれ、熱電対の種類により数値は若干異なるが、結果は常に微小な電位差（クロメル-コンスタンタンの場合 20°C のとき 0.75μV/bar）で表わされる。この点において普通のサイクロメータ（乾湿球湿度計）とは異なるので、一般にはサーモカップルサイクロメータ（熱電対湿度計）として区別されている。

III サンプルの大きさと平衡時間との合理的決定について

サイクロメータは、U. S. A. においては既に実用に供されてはいるが、chamber 等の中で気温、湿度が正確に制御された条件の下での測定例が大多数を占め、一般に計測には長時間を費している。なかでも平衡時間については、温室内での測定において2.5～6時間を要したという報告もあり⁽⁵⁾、少なくとも数十分以上経過しないと定常値が得られないというのが客観的事実のようである。従って現状のままでは、迅速な多点測定を要する野外での計測にはとても適用できないように思える。そこで、主としてこの平衡時間の短縮を目的として、一定の水分ポテンシャルをもった NaCl 溶液によるキャリブレーションの結果をもとにして、サンプルの大きさとの関連性から、平衡時間の選定について検討を加えた。測定に際し、溶液濃度は 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0mol（それぞれ 25°C で 4.6, 9.2, 23, 46, 92bar に相当する）の 5 段階に、サンプル量は 10, 20, 50, 100, 200mg の 5 段階に、また平衡時間については 0, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10, 20min の 7 段階にとり、それぞれの組合せによって、合計 175 通りの場合についてキャリブレーションした。それらの結果のうち、代表的なものの一部を図-1 に示す。

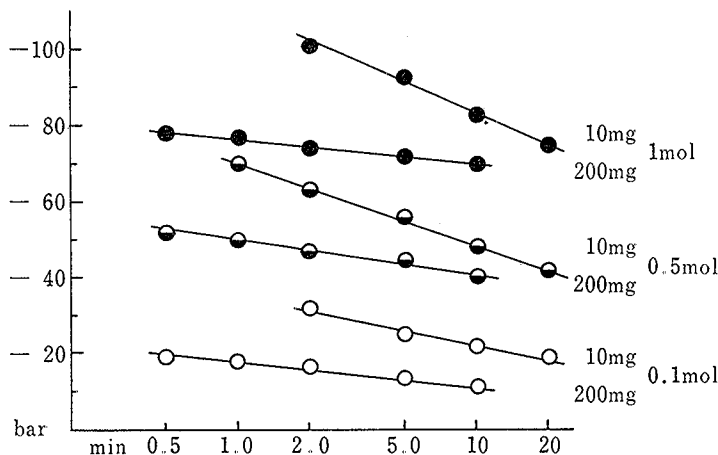


図-1 キャリブレーションでの平衡時間

図-1 におけるポテンシャルの値は、従来の慣例に従い、すべて 25°C の換算値を採用している。また、容器は容量約 300ml のものを用いているので、試料が 200mg の場合には容器の約 70% の体積を、また 10mg では約 3% の体積を占めていることになる。その結果は図-1 からわかるように、一般にサンプルの量が多いほど平衡に要する時間が短くなる傾向にはあるが、今回の最長時間である 20min を経過しても、未だ平衡に達しているとは考えにくい状況にある。この点に関する実用上の問題として、特に植物の水分生理からみると、計測はサンプリングの直後に行なうのが原則であるので、その意味からは、ポテンシャルの平衡に長時間を要するサイクロメータを実用化するには、

何らかの工夫を要するようになる。そこで我々は、20min 以内の平衡時間でもポテンシャルと測定値とが一一対応していることに着目し、非平衡下での計測による実用化の可能性を検討した。具体的には、平衡時間 5min 未満での計測においては、計器の指針が不安定となり、測定不能となる場合が多かったので ($76/369 \approx 21\%$)、指針が安定し ($87/91 \approx 96\%$)、しかも短時間で計測が可能な臨界時間として、5min を採用するのが妥当であると考えた。そこで、実用に供する為のキャリブレーションの結果として、平衡時間 5min における計器の読みのポテンシャル換算値を図-2 に示す。

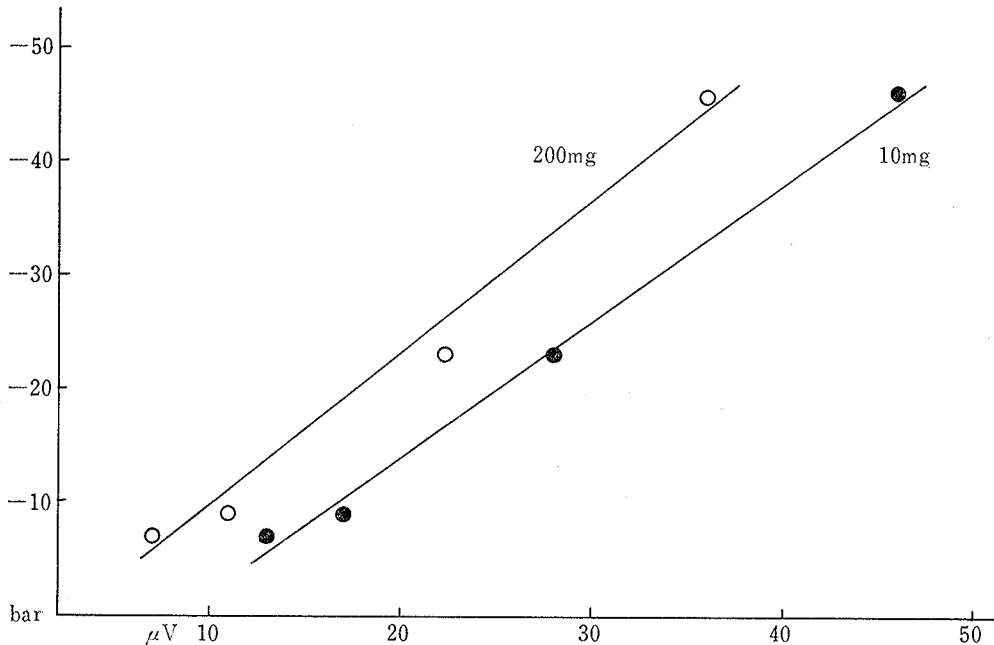


図-2 キャリブレーション結果 (平衡時間 5min)

このように、非平衡下における計測結果を採用することにより、測定に要する時間を大幅に短縮することが可能となったが、それと同時にサンプルの大きさについても考究すると、試料重量 20mg (容量の約 7%) 未満の場合には指針が不安定となる場合が多かったので ($50/232 \approx 22\%$)、サンプル量はできるだけ多く、できれば容量の 10% 以上を供試すべきであるものとする。特に測定の対象が葉の場合には、湾曲や表面の毛茸によってみかけの体積が著しく増大することが予想されるので、容器に収容できる最大限採取するのが適当となろう。またサンプル量の変動が測定結果に及ぼす影響については、葉の採取枚数を一定にしておくことにより、実用上ある程度消去しうるのではなからうか。

IV 葉の水分ポテンシャルの測定について

サイクロメータによる実際の植物の葉やその他の組織の水分ポテンシャルの測定は、これまでに綿の D. P. D. の測定例⁽¹⁾をはじめとして、じゃがいもや穀類を対象にした例⁽¹¹⁾や、こしょうの葉、幹、根群域、土壤の水分ポテンシャルを総括的にとらえた例⁽⁶⁾などがみられ、わが国においても金木ら⁽⁷⁾が、氷点降下法との対応の下に、非破壊連続測定の可能性が実証されたと報告している。しかしながら、一般にサイクロメータによる葉の水分ポテンシャルの測定は、土壤水分ポテンシャルを対象とした場合よりも困難であるとされており^(5,10)、また、同一の葉においても、採取した部位によって測定結果が異なるという報告もあり⁽²⁾、今後の検討を要する事柄が多い。

ここでは、III で得られた結果をもとにして、径 8mm (断面積 0.5 cm²) の丸型リーフパンチによって 2~6 枚 (容量 300ml 一ばい) 採取した 4 種の植物 (グロキシニア、ハイビスカス、ゴム、アナナス) の葉の水分ポテンシャルを測定し、これを葉の水分値 (含水比、面積当り水分) との関連でとらえた。その結果は表-1 に示すとおりである。

表-1 葉の水分とポテンシャルの関係

	含 水 比		面積当り水分	
	回 帰 式	相 関	回 帰 式	相 関
グロキシニア	$y = -0.00502x$ -48.1	-0.577**	$y = -0.341x$ -53.6	-0.386
ハイビスカス	$y = -0.0523x$ -116	-0.274	$y = -6.03x$ -17.7	-0.799**
ゴ ム	$y = -0.123x$ -95.5	-0.421	$y = -0.738x$ -88.1	-0.363
ア ナ ナ ス	$y = -0.162x$ -90.0	-0.521*	$y = -5.82x$ -106	-0.675**

この表からわかるように、水分ポテンシャルと含水比との相関は-0.3~-0.6となり、99%水準で有意なもの1、95%水準で有意なもの1、他の2つは有意性が認められなかった。また、面積当り水分との相関は-0.4~-0.8となり、99%水準で有意なもの2、他の2つは有意性が認められないという結果となった。一般に土壌の場合には、含水比と水分ポテンシャルとが良好な対応をみせることが知られており、この結果はそれに比べてやや低い相関を示しているものと判断できる。その原因は試料中の気孔の数の多少や、葉脈部分の占有率がサンプル毎に一定でない、いわゆる組織の不均一性によるところが大きいものと考えられる。また、葉の水分量については、

$$\text{水分飽和度 (relative turgidity)} = (\text{水分量} / \text{飽和水分量}) \times 100 (\%)$$

で表わされることが多いようであるが⁽⁹⁾、この式の分母を求める際にはかなりの誤差が伴い、測定も煩雑であると考えられるので、今回は採用しなかった。この点については、水分飽和度が面積当り水分量によって、ある程度代用できるのではないかと考えている。一方、表-1における回帰式の勾配や切片の大きさが、植物の種類によってかなり大幅に異なった値を示していることから類推すると、この結果は将来、葉の性状をもとにした植物の水分生理的特性を表わす指標としても用いられうるであろう。

更に、これらの供試植物に対する計測上の平衡時間の検討をもあわせて行なった。測定に際してはIIIで得られた結果のうち、特に平衡時間を5minにとることの是非の判定に主眼点を置き、2minの場合と10minの場合との比較によって測定値の安定性を検討した。それらの結果のうち一部を実用に即してpF表示し、表-2に示す。

表-2 植物での平衡時間

	2min	5min	10min
グロキシニア	pF 4.6	pF 4.4	pF 4.4
ゴム	5.0	4.9	4.8
ハイビスカス	5.0	4.9	4.8
アナナス	4.7	4.6	4.5
0.5 mol×20 ml	4.8	4.7	4.7
0.5 mol×50 ml	4.7	4.7	4.6

この表からわかるように、植物の葉を測定の対象とした場合には、キャリブレーションの場合と比べて、若干平衡時間が延長する傾向があるように思える。この原因としては、切断に伴う気孔の閉鎖、萎凋等、生理現象の衰退に起因する要素が考えられる。従ってこの意味からも、葉を対象とした測定においては、採取直後の状態がその実状を最もよく表わしているものとみなすことができる。それと同時に、できれば葉を切断することなしに水分ポテンシャ

ルを測定することが望ましいことも示唆されるので、これらの問題については今後の研究を通じて解明してゆきたいものと考えている。

引用文献

- (1) BOX, J. E. JR.: Measurement of water stress in cotton plant leaf discs with a thermocouple psychrometer. *Agron. J.*, **57**, 367-370 (1965).
- (2) BOYER, J. S., GHORASHY, S. R.: Rapid field measurement of leaf water potential in soybean. *Agron. J.*, **63**, 344-345 (1971).
- (3) CAMPBELL, G. S., ZOLLINGER, W. D., TAYLOR, S. A.: Sample changer for thermocouple psychrometers: construction and some applications. *Agron. J.*, **58**, 315-318 (1966).
- (4) CAMPBELL, G. S., CAMPBELL, M. D.: Evaluation of a thermocouple hygrometer for measuring leaf water potential *in situ*. *Agron. J.*, **66**, 24-27 (1974).
- (5) EHLIG, C. F.: Measurement of energy status of water in plants with a thermocouple psychrometer. *Plant Physiol.*, **37**, 288-290 (1962).
- (6) GEE, G. W., LIU, W., OLVANG, H., JANES, B. E.: Measurement and control of water potential in a soil-plant system. *Soil Sci.*, **115**, 336-342 (1973).
- (7) 金木亮一・富田正彦: サイクロメータによる水分ポテンシャルの測定について: 農土講要旨集, 昭和50年度 314-315 (1975).
- (8) KNIPLING, E. B., KRAMER, P. J.: Comparison of the dye method with the thermocouple psychrometer for measuring leaf water potential. *Plant Physiol.*, **42**, 1315-1320 (1967).
- (9) KRAMER, P. J.: Water stress and plant growth: Symposium (response of field crops to environmental factors). *Agron. J.*, **55**, 31-35 (1963).
- (10) RAWLINS, S. L.: Some new methods for measuring components of water potential. *Soil Sci.*, **112**, 8-16 (1971).
- (11) SHEPARD, W.: A simple thermocouple psychrometer for determining tissue water potential and some observed leaf maturity effects. *J. Exp. Bot.*, **24**, 1003-1013 (1973).
- (12) SPANNER, D. C.: The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *J. Exp. Bot.*, **2**, 145-168 (1951).

MEASUREMENT OF LEAF WATER POTENTIAL WITH A THERMOCOUPLE PSYCHROMETER

Matsuji MATSUDA, Koh-ichiro ASANUMA and Noriyoshi YAMADA

Summary

In the irrigation planning, a precise measurement of leaf water potential is of major importance. The determination of it is difficult by any methods for measurements, yet the measurement with a thermocouple psychrometer seems the most promising method for practical use.

Using a thermocouple psychrometer, we discuss in this paper especially on the rapid measurement for saving time and on any other problems for the measurement of leaf water potential.

Results are summarised as follows;

1. Though a state of equilibrium is not attained sufficiently, 5 minutes of response time seem most practical for measurement of leaf water potential.

2. As for relations between moisture ratio and leaf water potential, and between moisture content per unit leaf area and leaf water potential, these have correlation coefficients of $-0.3 \sim -0.6$ and $-0.4 \sim -0.8$, respectively.

3. After 5 minutes of response time, there are yet some fluctuations in measured value. So it seems desirable without punching off a leaf to measure the leaf water potential, if possible.