

ギャップ変化法によるイネ葉身水分含量の 非破壊計測に関する基礎的研究

Fundamental Study on Non-destructive Measurements of Leaf Water Content of Rice by Gap Change Method

増田好治・藤井道彦

Yoshiharu MASUDA and Michihiko FUJII

(平成7年10月2日受理)

Abstract

Measurements of water content of rice leaf by gap change method is described. Water content can be measured without the influence of leaf width, even in the case that leaf width changes. Linear relationship was observed between relative dielectric constant and water content of rice leaf. As a result of this experiment, we could obtain the possibility of this method for the non-destructive measurements of leaf water content.

1. はじめに

植物体の生理機能は、葉身の水分状態に大きく影響される¹⁾。イネにおいても、葉身水ポテンシャルの低下とともに光合成は抑制されるので²⁾、水ストレス条件下におけるイネの生育を高く維持するための生理的な基礎データとして、また、水田における中干し後の給水時期を判定する上での生理的指標として、イネの水分状態の非破壊計測は重要である。

植物体の葉身水ポテンシャルの測定法にはサイクロメータ法とプレッシャーチェンバ法がある。サイクロメータ法には非破壊計測した例もあるが^{3,4,5,6,7)}、プレッシャーチェンバ法もサイクロメータ法も基本的には破壊計測である。

著者らは前報で、茎内静電容量の変化を測定することにより、イネの茎の水分状態の非破壊計測を試みた⁸⁾。一方、光合成は主として葉で行われるため、葉身水分状態を捉えることは非常に重要である。前報の方法で葉身水分状態を測定するには、葉の表裏に導電性テープを貼り、コンデンサを形成して測定することになる。しかし、土壤乾燥条件下にあるイネに給水した場合は、時間の経過とともに葉の厚さが変化し、コンデンサの電極間距離が変わってしまうことになるので、前報の方法は適用できない。本研究では、葉の厚さを測定することによって、厚さの変化に影響を受けずに測定することが可能なギャップ変化法を用いて、葉身水分含量の非破壊計測のための基礎的研究として、イネの葉身水分含量の計測を試みた。

2. 測定原理

ギャップ変化法による試料の比誘電率の測定原理は、以下の通りである。

2. 1 試料をはじめに挿入する場合

まず、Fig. 1 (A)に示すように、 t_0 の間隔をもつ金属製円板電極PとQとからなる平行板コンデンサ中に厚さ t の試料を挿入しておく。このとき、P-Q間の静電容量 C は厚さ t の試料による容量 C_t と距離 $(t_0 - t)$ による空隙部分の容量 C' との合成容量である。

したがって、空気の誘電率を ϵ_0 、試料の比誘電率を ϵ_s 、電極Pの面積を A とすると次式が得られる。

$$C_t = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{t}$$

$$C' = \frac{\epsilon_0 A}{t_0 - t}$$

$$C = \frac{C_t C'}{C_t + C'}$$

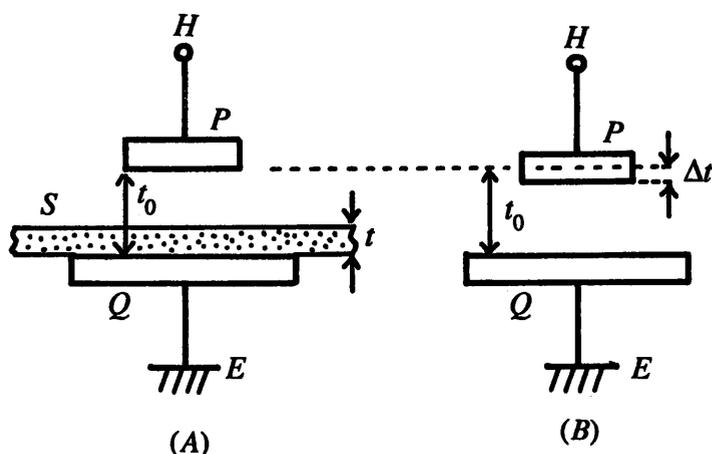


Fig. 1. Principle of gap change method in the case that test material is inserted at the start of the measurement.

ここで試料を取り去るとP-Q間の容量は減少するので、Fig. 1 (B)に示すように電極Pを Δt だけ近づけ、電極間の距離を $(t_0 - \Delta t)$ として最初の容量 C と等しくなるようにする。したがって、次式が得られる。

$$\frac{\epsilon_0 A}{t_0 - \Delta t} = C = \frac{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{t} \times \frac{\epsilon_0 A}{t_0 - t}}{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{t} + \frac{\epsilon_0 A}{t_0 - t}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{t + \epsilon_s t_0 - \epsilon_s t} \quad (1)$$

$$\therefore \epsilon_s = \frac{t}{t - \Delta t} \quad (2)$$

(2)式により、試料の厚み t とギャップ変化 Δt を測定することによって、試料の比誘電率 ϵ_s を求めることができる。数メガヘルツの周波数領域においては、植物組織の比誘電率が2程度であるのに対し、水の比誘電率は81と大きいので、試料を植物とした場合、(2)式による ϵ_s の値から植物組成内の含水量を知ることができる。

2. 2 試料を後から挿入する場合

Fig. 2 (A)に示すように、電極間の距離を t_0 に保ったときの容量を C とすると次式が得られる。

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{t_0}$$

次に、Fig. 2 (B)に示すように、厚さ t の試料を挿入すると電極間容量は増加するので、電極 P を Δt だけ遠ざけ、 $P-Q$ 間の容量を C と等しくする。このときの $P-Q$ 間容量は厚さ t の試料による容量 C_1 と距離 $(t_0 + \Delta t - t)$ による空隙部分の容量 C' との合成容量である。したがって、次式が得られる。

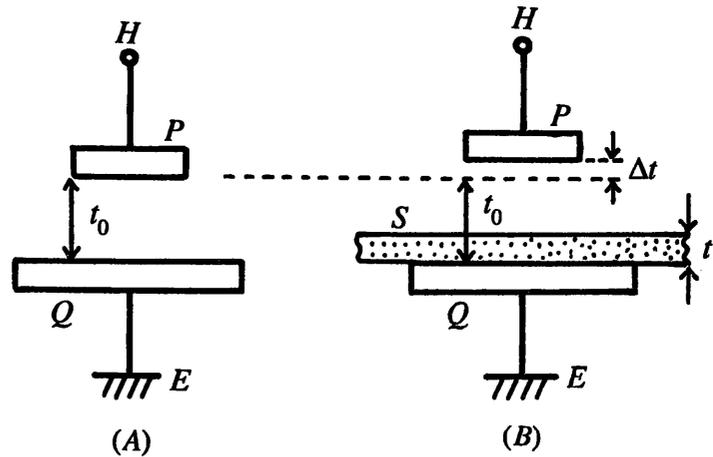


Fig. 2. Principle of gap change method in the case that test material is inserted afterwards in the measurement.

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{t}$$

$$C' = \frac{\epsilon_0 A}{t_0 + \Delta t - t}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{t_0} = \frac{C_1 C'}{C_1 + C'} = \frac{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{t} \times \frac{\epsilon_0 A}{t_0 + \Delta t - t}}{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{t} + \frac{\epsilon_0 A}{t_0 + \Delta t - t}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{t + \epsilon_s t_0 + \epsilon_s \Delta t - \epsilon_s t} \quad (3)$$

$$\therefore \epsilon_s = \frac{t}{t - \Delta t} \quad (4)$$

(4)式は(2)式と同じであり、試料をはじめに挿入しても後から挿入しても、同じ結果が得られる。

3. 供試材料と実験方法

供試材料としては、インド型水陸両用稲である Dular 1 を用いた。Dular 1 は、干ばつ抵抗性の品種である⁹⁾。また、Dular 1 は日本型水稻と比べて葉幅が広いので、測定の際に必要な、電極を完全に覆う幅の広い葉身が多く、測定が容易である。

1995年5月25日に、催芽種子をペーパーポットに播種した。測定には、ポット栽培したイネと、圃場で栽培したイネとを用いた。ポット栽培では、6月28日に1/5000aワグナーポットに1本植えて移植した。施肥は、元肥としてポット当たり窒素1.5gを与えた。ポット栽培では、乾燥処理を行うまでは湛水状態を保った。一方、圃場栽培では6月16日に、ビニルハウスで降雨を遮断した畑地に、条間30cm、株間15cmの1本植えて移植した。施肥は、元肥として10a当たり窒素成分量で5kg、追肥として5kgを与え、合計で窒素10kgとした。活着後は灌水を停止し、土壌乾燥処理を行った。

ポットで湛水栽培したイネでは、9月15日にポット下側のゴム栓をはずして排水し、9月18日まで土壌を乾燥させた。このポットをP1とする。

一方、圃場栽培したイネは、9月18日に根をできるだけ切断しないように注意して土壌ごと掘り取り、1/5000aワグナーポットに移植した。このポットをP2とする。

9月18日に、土壌を乾燥させたP1とP2に再給水して湛水状態とし、イネの葉身の水分含量の変化を測定した。再給水前の土壌水分含量は、P1で乾燥土壌当り6.9%、P2で3.7%であった。再給水前において、P1ではイネの葉身は軽い萎凋を示し、巻きかけた状態であった。一方、P2では葉身は完全に萎凋し、強く巻いた状態であった。

ギャップ変化法によって水分含量が測定可能であることを確認するため、イネの葉について測定する前に、水で濡らした濾紙を用いて、乾燥に伴う濾紙の水分含量の変化を測定した。

測定には、先に示した測定原理の「試料をはじめに挿入する場合」を用い、濾紙およびイネの葉を試料とした。比誘電率と水分含量との対応を検討するために、本実験ではイネの葉を試料とする際に、カッターナイフを用いて基部で切断した葉身を用いた。Fig. 3に示すように、イネの葉身 (leaf blade) の中で中肋 (mid-rib) が比較的硬く厚みが大いので、葉身全体の厚さを測るときに不都合である。そこで、Fig. 4に示すように、電極Qの直径部分に溝を作り、そこに中肋を落として葉身全体の厚さ t を測定した。また、中肋内には破生通气腔 (lysigenous aerenchyma) とよばれる空隙が存在し、葉身の他の位置とは内部構造が異なるが、中肋を溝に落とすことによって中肋を除外して測定することができる。また、測定原理の説明ではPを移動させたが、実際には電極の構造上、Qを動かすことによって測定を行った。なお、用いた電極

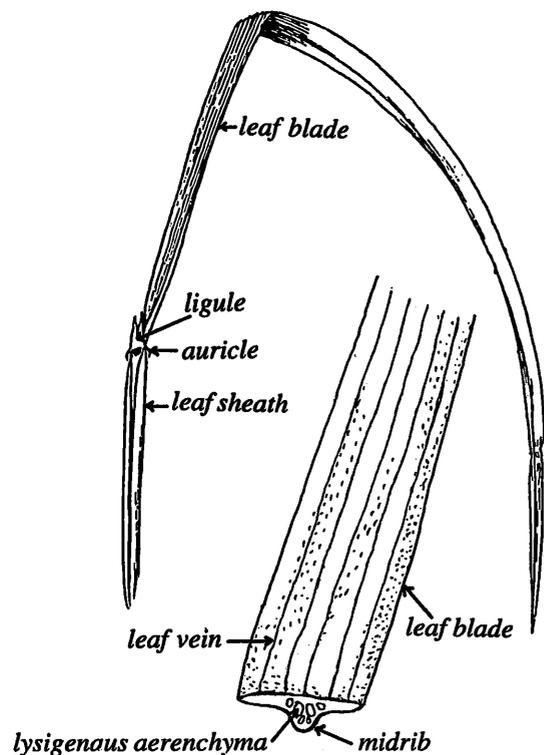


Fig. 3. Structure of rice leaf. This figure is adapted from Hoshikawa¹⁰.

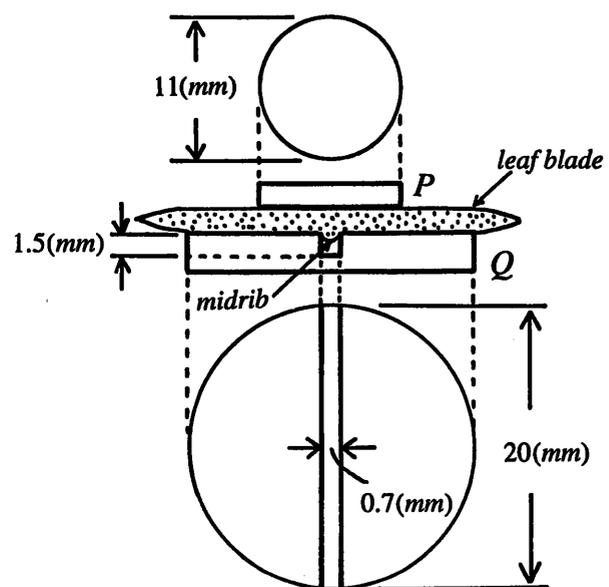


Fig. 4. Structure of the electrode.

Pの面積Aの値は $0.95 \text{ (cm}^2\text{)}$ である。tの測定は、Fig. 5に示す電極を用いて行う。マイクロメータAにより電極間距離 t_0 を目標値に設定する。本実験では、 $t_0 = 2 \text{ (mm)}$ とした。DCモータMを駆動してマイクロメータヘッドBを左へ移動させると、Cが傾斜Dに沿って上側に移動し、同時にC上に置かれたスピンドルFが上昇する。くし形格子電極Gの上に感圧ゴムKが置かれている。電極Qが上昇し、イネの葉Sを押しつけ、一定圧力になると感圧ゴムの抵抗値が変化することにより格子電極間の抵抗値が目標値に到達する。その値を電圧に変換し、コンパレータを介してリレー回路に導き、モータの駆動回路を切り電極Qの上昇を停止させる。このときのマイクロメータの目盛りからtを測定する。

Δt の測定は次の通りである。Fig. 1 (A)に示す端子Hを高周波抵抗容量計^{8, 11, 12)}に接続し、イネの葉を挿入したのち t_0 を 2 (mm) に設定し、このときの容量出力を零にする。抵抗容量計の使用周波数は 6 (MHz) である。次に、イネの葉を除くと容量出力は負となるので、マイクロメータを容量出力が零になるよう調節し、このときのマイクロメータの読みと t_0 の値 2 (mm) との差を Δt とする。

ギャップ変化法による測定の後、ただちに用いたイネの葉の生体重を測定した。その後、葉を通風乾燥機に入れて 80°C で48時間以上乾燥させた後、乾物重を測定し、葉の水分含量を求めた。濾紙についても、同様にして湿潤状態での重さと乾物重から水分含量を測定した。

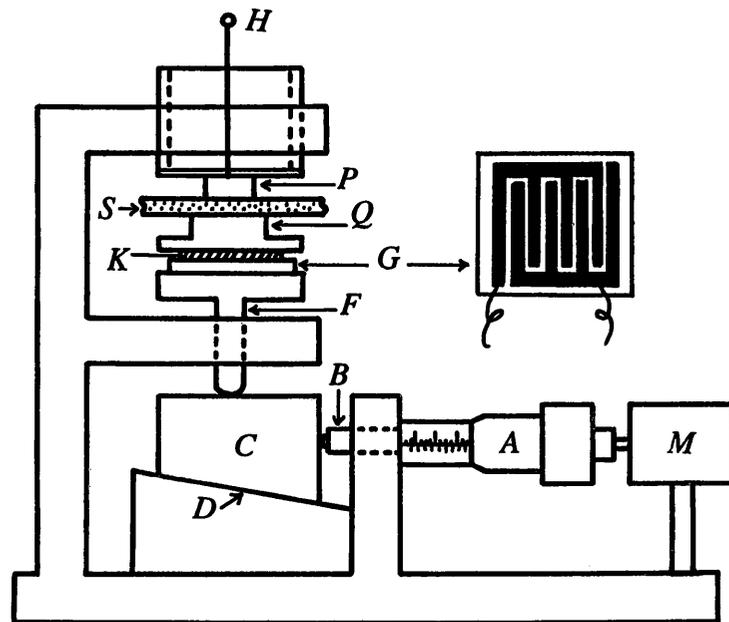


Fig. 5. Measuring instrument for gap change method.

- A : micrometer thimble, B : micrometer head, C : movable table,
 D : inclined plane, F : spindle, G : grid type electrode,
 H : lead wire, K : pressure sensitive rubber, M : D-C motor,
 P : electrode (high potential side), Q : electrode (earth side),
 S : sample (leaf of rice)

4. 結果と考察

水で濡らした後、異なる時間乾燥させた濾紙について、本測定法により求めた比誘電率 ϵ_s と、乾物重当りの水分含量 M_d との関係を図. 6 に示す。両者間には直線関係が認められた。

乾燥土壤に給水したときのイネの葉について求めた比誘電率 ϵ_s と、乾物重当り水分含量 M_d との関係を図. 7 に示す。両者間には、濾紙の場合と同様に直線関係が認められた。すなわち、比誘電率 ϵ_s を X 、葉身水分含量 M_d を Y とする

と、P 1 では $Y=93.5+39.9X$ ($r=0.925^{**}$) で表され、1%水準で有意であった。また、P 2 では $Y=77.0+21.4X$ ($r=0.986^*$) で表され、5%水準で有意であった。なお、測定に用いたイネの葉身の乾物重は、0.08~0.28gであった。

P 1 と P 2 とでは直線の傾きが異なったが、この原因は次のように考えられる。P 2 では葉が萎凋して強く巻いていたため、測定の際に葉を広げる必要があった。このため、葉の厚さの測定と、葉で電極を完全に覆うことが難しく、測定上の誤差が大きかった可能性がある。したがって、P 2 は参考データとして示している。本測定法によって求めた比誘電率と水分含量との関係についての、イネの栽培条件による差の検討は、今後の課題である。

本実験では、カッターナイフを用いて基部で切断した葉身を試料としたので、再給水後における葉身の水分含量の回復を、1回の測定ごとに異なる葉を用いて測定している。図. 7 において若干ばらつきがみられるのは、異なる葉を用いて測定したことが原因だと考えられる。しかし、実際の適用においては、同一の葉について測定をするため、ばらつきは小さくなると思われる。

図. 7 から、栽培条件によって比誘電率と水分含量との直線式が異なる場合においても、両者間の関係は直線的であることから、1枚の葉について比誘電率と水分含量の関係を破壊計測すれば、他の葉については非破壊計測が可能である。

また、前報⁹⁾の方法では、ある状態からの容量の変化量の測定であるので、異なる測定部分

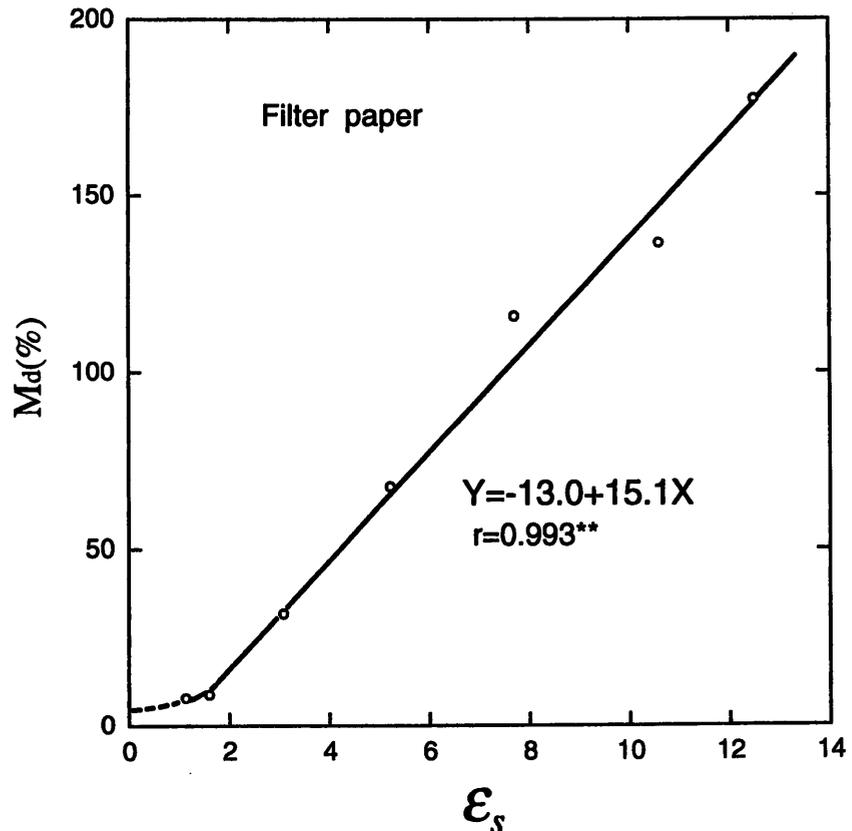


Fig. 6. Relation between water content and relative dielectric constant in the case of filter paper.

の値を比較することができなかったが、本測定法では比誘電率を求めることから、異なる測定部分の水分含量の絶対値を比較することが可能である。

乾燥条件下のイネに給水した場合、葉の厚さが変化するために、前報の方法⁹⁾では葉身水分状態を測定することができなかった。試みに1枚の葉について厚さの変化を測定してみた結果、給水前の葉が軽く巻いた状態での厚さは0.459mmであったものが、給水によって萎凋から回復したときの葉の厚さは0.569mmで、24%厚くなった。

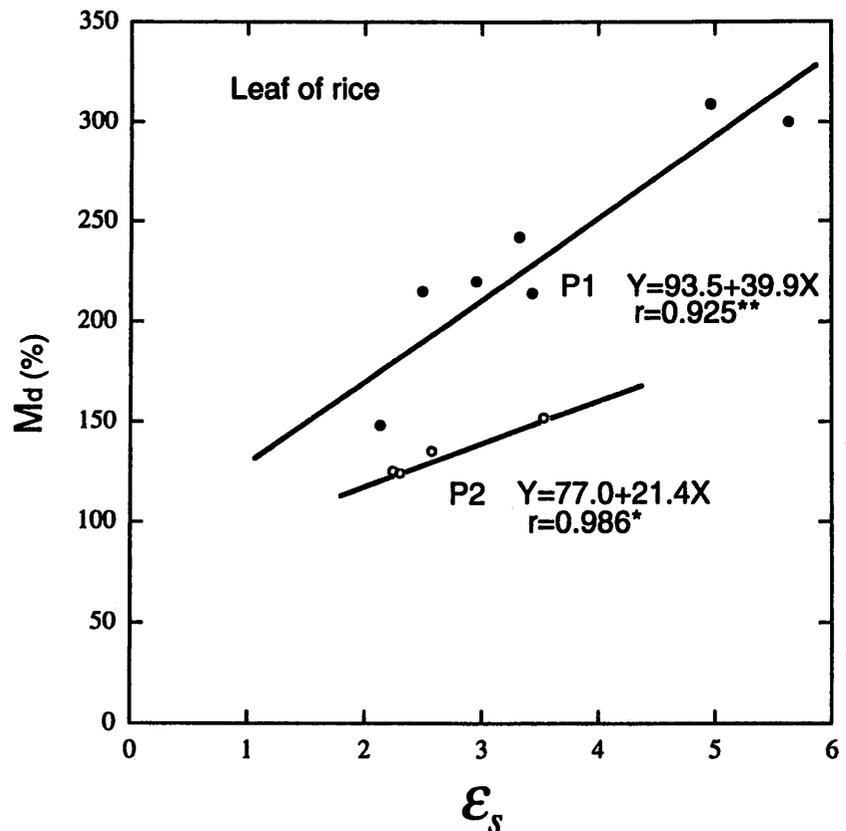


Fig. 7. Relation between water content and relative dielectric constant in the case of rice leaf.

5. まとめ

本研究では、ギャップ変化法を用いて、イネの葉身水分含量の計測を試みた。ギャップ変化法では、葉の厚さを測定しているため、葉の厚さが変化する場合でも、葉の厚さに影響されずに水分含量を測定することができる。実験によって求めたイネの葉の比誘電率と水分含量との間には直線関係が認められ、葉身水分含量の非破壊計測に対する本方法の有用性が示された。比誘電率と水分含量との関係についての、イネの栽培条件による差の検討、ならびに測定システムの自動化については、今後の課題である。

最後に、本研究は財団法人「新技術開発財団」の助成を受けたことを付記し謝意を表します。本研究において使用した電極の作製に協力いただいた、本学部大倉宏之技官に感謝致します。

引用文献

1. Boyer, J.S. 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiol.* 46:233-235.
2. Ishihara, K. and H. Saito 1983. Relationship between leaf water potential and photosynthesis in rice plants. *JARQ* 17:81-86.

3. Boyer, J.S. 1968. Relationship of water potential to growth of leaves. *Plant Physiol.* 43:1056-1062.
4. Brown, P.W. and C.B. Tanner 1981. Alfalfa water potential measurements, a comparison of the pressure chamber and leaf dew-point hygrometer. *Crop Sci.* 21:240-244.
5. Shackel, K.A. 1984. Theoretical and experimental errors for in situ measurements of plant water potential. *Plant Physiol.* 75:766-772.
6. Shackel, K.A. 1987. Direct measurement of turgor and osmotic potential in individual epidermal cells. *Plant Physiol.* 83:719-722.
7. Brown, R.W. and D.M. Oosterhuis 1992. Measuring plant and soil water potentials with thermocouple psychrometers: some concerns. *Agron. J.* 84:78-86.
8. 増田好治・一條文二郎・藤井道彦 1994. 携帯型低インピーダンスメータ. 計測自動制御学会論文集 30:9-15.
9. Steponkus, P.L. and J.M. Cutler 1980. Adaptation to water stress in rice. In N.C. Turner and P.J. Kramer ed., *Adaptation of plants to water & higher temperature stress.* Wiley Interscience, New York. 401-418.
10. 星川清親 1975. 解剖図説 イネの生長. 農文教, 東京. 94-102.
11. Masuda, Y., N. Nishikawa and B. Ichijo 1980. New methods of measuring capacitance and resistance of very high loss materials at high frequencies. *IEEE Trans., IM-29-1:28-36.*
12. Ichijo, B., Y. Masuda, N. Tarao and M. Sada 1989. Widely extended new method for measuring the impedance (C_x , R_x) at high frequencies with applications. *IEEE Trans., IM-38-1:64-73.*