

解	説
---	---

サイクロメータによる土壌水のポテンシャル測定

塩 沢 昌*

Soil Water Potential Measurement Using Psychrometers

Sho SHIOZAWA

Faculty of Agriculture, The University of Tokyo

はじめに

土壌水のポテンシャルは土壌水の存在状態を表わし、土中の水移動と植物の吸水のしやすさ、その他、土の様々な性質にかかわるので、これを測定することは土壌の物理的測定のなかで基本的なものである。また、マトリックポテンシャルと含水量との関係である水分特性曲線は、土の物理的性質の最も重要なものである。現場でのマトリックポテンシャルの測定は、比較的水分の多い領域ではテンジメータで測定され、 -15 bar ($\text{pF } 4.2$) までの水分特性曲線は吸引法や加圧板法で測定できる。これに対して、 -1 bar ($\text{pF } 3$) 以下の水分の少ない領域のポテンシャルを測定する方法として現在、最も適切な方法は、少なくとも実験室における測定法としては、サイクロメータ法であると言ってよい。

サイクロメータ(註)は試料の水ポテンシャルを、これと平衡状態にある空気の相対湿度を測定して求めるものである。しかし、この相対湿度は、植物の永久しおれ点とされる -15 bar でも約0.99でほとんど飽和であり、この程度またはこれ以上の水分領域で水ポテンシャルを求めるには、きわめて精度の高い相対湿度の測定が必要である。そのために、これまで相対湿度の測定精度と信頼性を高めるために、測定原理とともにサイクロメータの構造、材質、電気回路などに多くの工夫と改良がなされてきた。この結果、今日のサイクロメータは、比較的乾いた土壌、植物、食品等の水ポテンシャル(または平衡相対湿度=水分活性)を測定する方法として、正確か

つ迅速で、実用性の高い方法になっている。

土壌、および植物の水ポテンシャル測定用に1970年代のはじめに最初に米国で市販されたサイクロメータはWescor社のSample Chamber C-51(今日では改良型のC-52)で、我国へは高倉⁷⁾が紹介し、岩間⁹⁾が土壌の水ポテンシャル測定に用いた報告をしている。このサイクロメータは、おもに葉の水ポテンシャル測定に広く使われている。その後、1980年代の半ばにDecagon Device社が土壌、植物、食品を対象にしたサイクロメータSC-10AとナノボルトメータNT-3を製品化した。これはWescor社のものに比べ、試料サイズが大きく、多数の試料の連続測定ができ、測定できるポテンシャル範囲が広く安定しているなど、土壌用に適したものである。さらにDecagon社は1988年に土壌、食品用に全自動化されたCX-1を製品化している。Decagon社の製品は何れもワシントン州立大学のG.S.Campbell教授の設計によるものであり、Wescor社のサイクロメータとマイクロボルトメータ(HR-33T)もCampbell教授と弟のE.C.Campbellらが設計したものである。WescorもDecagonも彼らの会社で、米国でのサイクロメータの実用化(製品化)は彼らによって進められてきたのである。

本論ではDecagon社の製品を中心に、土壌用サイクロメータの原理、装置、測定上の注意点を述べ、水分特性曲線の測定例を示す。

1. 測定の原理

土壌水のポテンシャルエネルギー Ψ と相対湿度 p/p_0 の間には次の関係がある。

$$\Psi = (RT/M) \ln (p/p_0) \quad (1)$$

ここに Ψ は土中水の単位質量当りのポテンシャル(Jkg^{-1})、 M は水の分子量($0.018 \text{ Kg mol}^{-1}$)、 R は気体定数($8.31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)、 T は絶対温度、 p と p_0 は水蒸

註) 岩間が指摘しているように⁹⁾、英語のpsychrometerは乾湿球湿度計に対して用いられ、露点測定による湿度計にはdew point hygrometerが用いられている。しかし本論の中では、広く湿度測定で試料の水ポテンシャル(または水分活性)を測定する装置を「サイクロメータ」、方法を「サイクロメータ法」と呼んでいる。

* 東京大学農学部 〒113 文京区弥生1-1-1
土壌の物理性 第62号 p.53~61 (1991)

気圧と試料の温度における飽和水蒸気圧である。(1)式によれば、20℃、相対湿度0.99において -1360 Jkg^{-1} (-13.6 bar)であり、植物が生育できる程度のポテンシャルでは、ほとんど0.99以上である。 p/p_0 が1に近いとき、(1)式は次式で近似できる。

$$\Psi = (RT/M) ((p/p_0) - 1) \quad (2)$$

水分ポテンシャル測定のためのサイクロメータは、小さなチャンパーの中に試料を入れ、平衡状態でチャンパー内の相対湿度を測定するものであるが、ほとんどのものは、非常に細い熱電対の接点を湿球として、試料チャンパー本体との温度差を測定するので、熱電対サイクロメータ (thermocouple psychrometer) と呼ばれる。

一般に、相対湿度を測定する原理は2つある。一つは湿球の温度低下を測定することであり、本論で紹介するSC-10Aはこのタイプの装置である。この方法では普通、事前にポテンシャルのわかっている塩溶液を使って出力電圧とのキャリブレーションの測定を行い、装置の特性を表す定数を決めておく。チャンパー内の熱電対接点に純水を付ける方法には、熱電対に電流を流し、ペルティエ効果で接点を露点まで冷却し、水蒸気を凝縮させる方法 (Spanner 形) と、接点を測定の前に純水に浸して附着させる方法 (Richards 形) がある。相対湿度を求めるもう一つの方法は露点温度を測定し、これと試料温度から相対湿度を求める方法である。この場合、露点を正確に求めるために制御回路や特別な装置が必要である。例えば Wescor 社の dew point microvoltmeter (HR-33 T) は時分割回路によって熱電対の温度降下に比例した冷却を与え、熱電対を露点に保つことができるようになっている。本論で紹介するCX-1も露点を求める方式である。

熱電対サイクロメータを単純化したモデルとして、図1aのように内壁を測定対象 (ある均一なポテンシャル、温度の土) で囲まれた空間内に湿球が存在する配置を考える。壁面の近傍の空気の相対湿度は土壌水のポテンシャルと平衡している。湿球近傍の空気は飽和水蒸気圧になるので、湿球から壁面に向かう水蒸気の拡散が生じ、湿球は蒸発によって潜熱を奪われて温度が低下する。一方、湿球の温度低下によって、壁面から湿球に向かう熱流が生じ、湿球の温度は、蒸発によって奪われる潜熱と温度差によって流入する顕熱が釣り合う温度で平衡する。上のポテンシャルが低いほど蒸発速度が大きく、湿球の温度低下は大きくなる。

湿球への熱伝達は、放射、空気の伝導と対流、熱電対ワイヤーの伝導からなる。内径が1 cm 程度の閉鎖空間では空気の伝導に比べて対流は無視でき、熱電対の伝導はワイヤーを細くすることで小さくできる。熱伝達が空気中の伝導だけで生じると仮定すると、図1aのような湿球の周囲の全面に試料が存在する配置では、チャンパーと湿球の大きさや形は、空気中の水蒸気拡散に対しても熱伝導に対しても、全く同じ効果をもつので、湿球の温度低下はチャンパーや湿球の大きさや形の影響を受けず、試料のポテンシャルだけで決まり、試料のポテンシャル (相対湿度) と湿球の温度低下との関係は理論的に決まる。このようなサイクロメータは「理想的サイクロメータ」と呼ばれる¹⁾。

実際のサイクロメータでは、試料はチャンパー壁面の全面を覆っていないので (図1b)、熱流は湿球を囲む全方向から湿球に向かうにもかかわらず、水蒸気の吸収は試料の存在部分に限られる。したがってサイクロメータ感度はチャンパー、試料、湿球の大きさ、形、配置に依存する。そこでポテンシャルの分かっている溶液を使っ

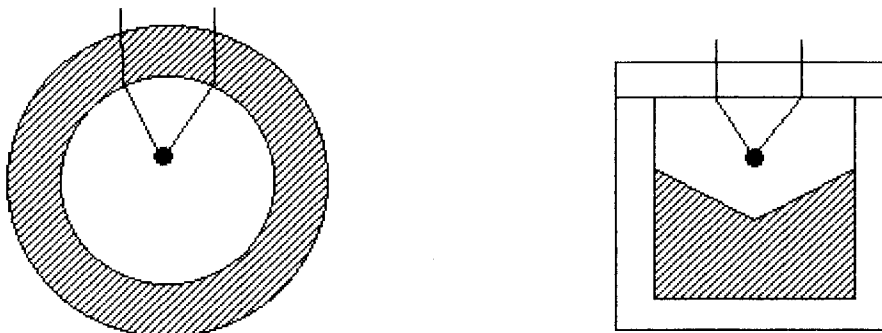


図-1 a 理想的サイクロメータ
Ideal psychrometer

b 実際のサイクロメータ
Actual psychrometer

て測定を行ない、上述のようなサイクロメータの個性に依存する部分を、サイクロメータ定数として決めることによって正確な測定が可能となる。キャリブレーションの測定では、塩溶液を濾紙に吸わせるなど、なるべく試料があるときと同じ配置にする。

湿球の熱収支を考えると、試料表面の水蒸気圧 p と湿球表面の水蒸気圧 (湿球温度における飽和水蒸気圧) p_{ow} の差と、湿球の温度低下 ΔT との関係は次式で与えられる。

$$p_{ow} - p = \gamma^* \Delta T \quad (3)$$

ここに、 γ^* は見かけのサイクロメータ定数であり、 $\gamma^* = \gamma r_v / r_{HR}$ 。ただし γ は熱力学的サイクロメータ定数 (0.067 kPa/K)、 r_v は水蒸気に対する移動抵抗、 r_{HR} は顕熱および放射の熱移動抵抗である。理想的サイクロメータでは $r_v = r_{HR}$ であり、 $\gamma^* = \gamma$ である。また、チャンパーの温度 (試料の温度) を T_d 、湿球の温度を T_w とすると、

$$\Delta T = T_d - T_w \quad (4)$$

である。飽和水蒸気圧-温度曲線 (図2) の ΔT 区間の平均勾配を s として

$$p_o - p_{ow} = s \Delta T \quad (5)$$

(5) 式と (3) 式より

$$\begin{aligned} p/p_o &= 1 - [(s + \gamma^*)/p_o] \Delta T \\ &= 1 - c \Delta T \end{aligned} \quad (6)$$

第二式は第一式の [] 内を c とおいたものであるが、 c は湿球の温度低下 1 K あたりの相対湿度の低下量、すなわちサイクロメータの感度を与える。とくに s と p_o は温度に強く依存するので、 c は温度に依存する。(6) 式によって、サイクロメータ感度の温度依存性を計算できる^{3,5)}。

飽和水蒸気圧 p_o は温度の関数として次の近似式で計算できる⁵⁾。

$$\begin{aligned} p_o(T) &= \exp(52.57633 - 6790.4985/T \\ &\quad - 5.02808 \ln(T)) \end{aligned} \quad (7)$$

ここに p_o の単位は kPa ($1/100 \text{ bar}$)、 T は絶対温度である。勾配 s も (7) 式から計算できる。

$$s = (p_o(T_d) - p_o(T_w)) / \Delta T \quad (8)$$

293 K において、 $p_o = 2.32 \text{ kPa}$ 、 $s = 0.143 \text{ kPa/K}$ であり、理想的サイクロメータの感度 c は 0.091 K^{-1} となる。

相対湿度が 1 に近いところでは、 ΔT が小さいので、 s および c を ΔT によらない定数とみなすことができる。この場合、さらに (6) 式を (2) 式に代入すると、

$$\Psi = -(RT/M)c \Delta T \quad (9)$$

となり、水ポテンシャルは ΔT に比例する。

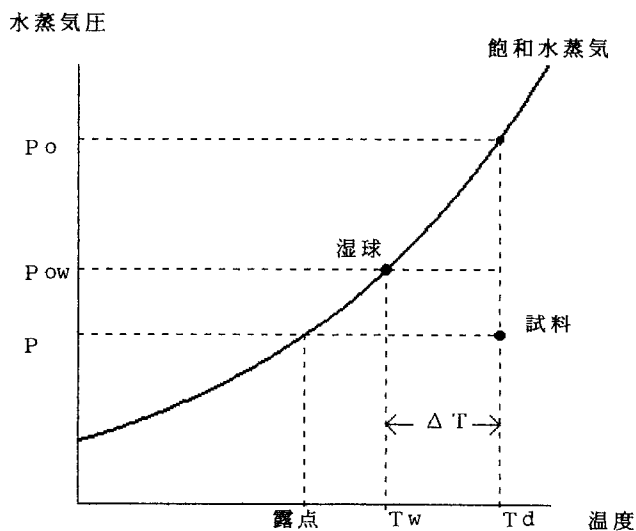


図-2 飽和水蒸気圧-温度曲線
Saturate water vapor pressure vs. temperature

2. 装置

ここでは、実験室用のサイクロメータとして市販のもののうち、土壌用として実用性が高いと思われる SC-

10A と CX-1 について述べる。製造者と価格は表 1 に示した。SC-10A は熱電対サイクロメータであり、CX-1 は露点測定形のものである。

表 1. 製品と製造者

	熱電対サイクロメータ Thermocouple psychrometer sample changer	ナノボルトメータ Nanovoltmeter -thermometer	露点サイクロメータ Water activity system
品番	SC-10A	NT-3	CX-1
価格 (US price)	\$1285	\$785	\$3985
製造	DECAGON DIVICE INC.		
住所	P.O. box 835, Pullman, WA 99163, USA		

(1) SC-10A

これは Sample Changer Psychrometer と呼ばれており、ステンレスの試料容器に 1 cc 程度の試料を詰めて、これを装置にセットし、熱的に平衡させ、チャンパーの温度 (= 試料の温度) と湿球の温度の差を測定する。装置全体は、周囲の温度変動に対して内部の温度を安定にし、しかも内部の温度分布が小さくなるように、ぶ厚いアルミニウムでできている。9 個の試料容器を同心円状に同時に入れて、中央のノブで回転できる。一つの位置の上部に熱電対があって、ピストンレバーを持ち上げるとこの位置の試料容器の中に熱電対が密閉されて測定を行なうことができる。この回転装置の一方所に純水を乗せた容器を入れて、熱電対接点を濡らすことができる。熱電対接点は小さなセラミックで包まれており、接点表面に十分な水分を均一に保持できることが精度の高い測定を可能にしている。

(2) NT-3

熱電対の出力電力の測定は、サイクロメータ用に作られたナノボルトメータ NT-3 で行なう。NT-3 は 3 桁のデジタル表示で、高感度モードでは 0.1 マイクロボルトの感度である。これは、SC-10A のクロメルコンスタンタン熱電対 (60 マイクロボルト/°C) で 0.0017°C の温度差を測定できる感度であり、ポテンシャルで約 10 kPa (0.1 bar) に相当する。またチャンパーの温度を 0.1°C の精度で測定できる。熱電対に冷却電流を与えるモードも備えており、Spanner 型のサイクロメータに対しても使用できる。

(3) CX-1

これは Water Activity System と呼ばれる最新の自動露点サイクロメータである。チャンパー内で空気をファンで循環させながら、小さなミラーをペルティエ効果で冷却し、フォトセンサーで光の反射から結露を感知する。マイクロコンピュータ制御で、露点付近でミラーの冷却の ON-OFF を繰り返しながら、正確な露点温度を求められるようにプログラムされている。試料温度の方は、赤外線温度計で表面温度を直接測定するようになっていたので試料とチャンパーの熱平衡をとる必要がない。計測は全て自動化されており、試料を装置にいれてスイッチをひねるだけで、数分で試料の相対湿度 (水分活性) が 3 桁で表示される。キャリブレーションもいらず、とくに注意すべきこともない。相対湿度の精度は 0.003 で、0.97 (ポテンシャル 40 bar) 以下の乾燥領域の測定に適している。試料は直径 3.8 cm の平たい樹脂容器に入れる。塩溶液を入れて測定すれば溶液の相対湿度 (浸透ポテンシャル) を知ることができる。

3. キャリブレーション

SC-10A のような熱電対サイクロメータは、まずサイクロメータ定数 γ^* を決める必要がある。 γ^* は相対湿度 (水分活性) のわかっている塩溶液を測定して求めることができる。低ポテンシャルのキャリブレーションには飽和塩溶液を使えばよい。測定した ΔT , T_d と溶液の p/p_o から、(4) (6) (7) (8) 式を使って γ^* を計算する。

たとえば、NaCl の飽和溶液 (相対湿度 0.755) を測

定した時のナノボルトメータの読みが $182\ \mu\text{V}$ で、チャンバーの温度が $24\ \text{C}$ ($T_d = 277.15\ \text{K}$)であったとしよう。このとき、熱電対の感度は $60\ \mu\text{V}/\text{C}$ なので、湿球の温度低下は

$$\Delta T = 182 / 60 = 3.04\ (\text{K})$$

(6) 式の c は

$$c = (1 - 0.755) / 3.04 = 0.0806\ (\text{K}^{-1})$$

湿球温度は $T_w = 277.15 - 3.04 = 274.01\ (\text{K})$

(7) 式から

$$p_o(T_d) = 2.984, \quad p_o(T_w) = 2.481\ (\text{kPa})$$

(8) 式から

$$s = (2.984 - 2.481) / 3.04 = 0.165\ (\text{kPaK}^{-1})$$

これより、

$$\begin{aligned} \gamma^* &= c p_o(T_w) - s \\ &= 0.0806 \times 2.984 - 0.165 = 0.076\ (\text{kPaK}^{-1}) \end{aligned}$$

ひとつの溶液で γ^* を決めることができるが、いくつかの溶液で測定して平均する方が信頼性が高いであろう。溶液の相対湿度と出力電圧の関係は図3のようになる。図3は KCl , NaCl , K_2CO_3 , MgCl_2 , LiCl の飽和溶液を使って作ったものであるが、2次曲線でよく表される。この関係は(6)式で与えられるが、直線でないのは ΔT の増加とともに s が小さくなり、 c が一定ではないためである。

高い相対湿度(約0.96まで)でキャリブレーションを行なうときは、濃度を変えた KCl や NaCl の溶液を使えばよい。 KCl の濃度および温度と相対湿度(ポテン

シャル)との関係は文献2に表になっている。高ポテンシャルでは、(6)式の s および c は ΔT によらない定数とみなせるので、 p/p_o と ΔT は比例関係である。さらに近似式(9)が成立するので水ポテンシャルと出力電力も比例関係となる。図4は KCl 溶液を使ってこれを確かめたものである。出力電圧に対するポテンシャルの感度は約 $200\ \text{J}/\text{kg}/\mu\text{V}$ ($2\ \text{bar}/\mu\text{V}$) である。

$\text{SC}-10\ \text{A}$ と理想的サイクロメータの γ^* のずれは15%程度であり、 c については5%程度になる。つまり、キャリブレーションなしに γ^* に γ を使っても、これによる誤差は5%程度であり、キャリブレーションで γ^* を決めれば装置の特性による誤差を十分小さくできる。

4. 測定の手順 (SC-10A)

試料は附属の棒を使って図1bのようにすり鉢状に詰める。容器上部は湿球用の空間を開ける。これを装置にいった後、試料チャンバーの温度を均一にするため、20~30分置く。湿球に純水を付け、試料を順番に、熱電対の位置で持ち上げて測定状態にする。出力電圧(湿球温度低下)がほぼ一定になったところで読み取り、チャンバーの温度も同時に記録する。試料のポテンシャルが低いときには湿球からの蒸発速度が大きく、出力電圧が一定になるまでの時間は短い。飽和に近いときは5~6分かかる。一つの試料が終わったらチャンバーを回転させて次の試料をセットし、最後に試料容器を取り出し

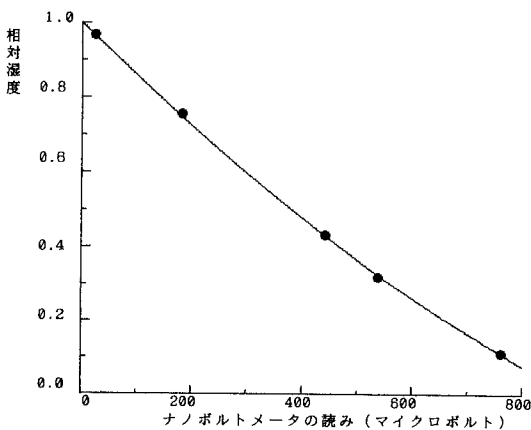


図-3 出力電圧と溶液の相対湿度の関係
(飽和塩溶液)
 μV -meter output vs. relative humidity for saturate solutions

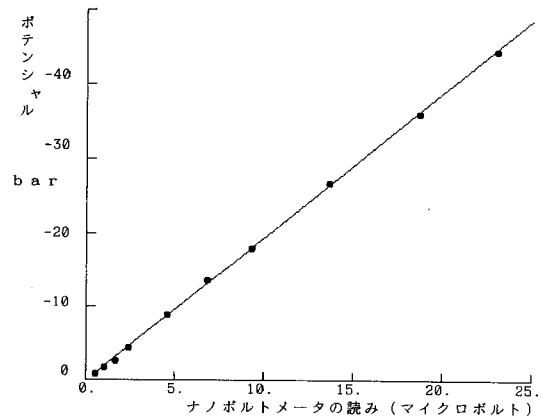


図-4 出力電圧と溶液のポテンシャルの関係
(KCl 溶液)
 μV -meter output vs. relative humidity for KCl solutions

て重量を測定し、炉乾燥して含水量を求める。

測定された ΔT と T_d から、(4) (6) (7) (8) 式を使って p/p_0 を計算できる。まず、(4) 式で T_w を求め、(7) 式によって $p_0(T_d)$ と $p_0(T_w)$ を計算し、(8) 式で s を求め、(6) 式で p/p_0 を求める。 γ^* が求めてあれば (6) 式が使えるので、キャリブレーションと温度が違ってもキャリブレーションをやり直す必要はない。

5. 測定誤差と注意点 (SC-10A)

熱電対サイクロメータでのポテンシャル測定は、試料と湿球との微小な温度差を測定するもので、試料-容器壁面の温度が均一であることが前提条件である。したがって、また、測定誤差を生む大きな原因はチャンパー内の温度差である。本来測定したいのは試料の表面温度と湿球温度の差であるが、実際に測定されるのは熱電対ワイヤーのチャンパーとの付け根の温度と湿球との温度差であり、この部分と試料との間に温度差があれば測定誤差となる。試料-チャンパー内に温度分布ができる原因は外界の温度変化が伝わることによる。したがって、測定を行なう上で最も重要なのは装置が置かれる温度環境である。筆者の経験では、数分~1時間程度の周期の室内の温度変化が最も大きく影響する。たとえば、数分~1時間程度の間隔で冷暖房器が ON・OFF するような通常の恒温室は、大きな温度変動がサイクロメータ内に伝わるので、測定環境としては最悪である。空調機器の ON・OFF がなく、なるべく温度変化の小さい室内（曇った日や夜間）がよい。精度のよい測定には、常時一定温度の空気を流している恒温チャンパー内にサイクロメータを置くか、またはチャンパー全体を断熱材で覆うのがよい。測定時のチャンパーの温度を測定していれば、いつも同じ温度で測定する必要はない。温度環境が適切であるかどうかは、熱電対接点が乾いた状態で、試料容器に試料を入れずに測定し、出力電圧がほとんどゼロで一定していることで確かめられる。

試料容器壁面に、試料以外の、チャンパー内の水蒸気圧に影響するような水蒸気の吸着（または放出）物質が付着していれば誤差を生む。このような物質の一つは容器の汚れである。容器はよく洗浄し、時々、金属用の洗剤で磨くとよい。また試料を不必要に長時間チャンパー内に放置すべきではない。

湿球の汚れは重大な誤差を生む。湿球は純水以外のものに接触させてはいけない。試料容器に試料を入れすぎると、湿球に接触してしまうので注意が必要である。湿

球が汚染されたときには純水でよく洗い流す。

SC-10A の精度は普通に注意深く測定して 10~20 J/kg (100~200 cm 水頭) 程度であり、-1 bar 以下の水分量領域の測定に適している。低ポテンシャル側は相対湿度で 0.1 (約-3000 bar) までは測定できる。

6. 浸透ポテンシャルの分離

サイクロメータで測定されるのは、トータルポテンシャル（すなわち、等温の純水を基準とする土壌水の化学ポテンシャル低下量）であり、マトリックポテンシャル成分と浸透ポテンシャル成分を含むものである。水分特性曲線を測定するような場合、必要なのは含水量とマトリックポテンシャルとの関係であるから、測定されるトータルポテンシャルから浸透ポテンシャルを差し引く必要がある。浸透ポテンシャルは、飽和抽出した土壌溶液のポテンシャルから含水量を考慮して推定することができる。飽和抽出溶液の濃度は、サイクロメータでポテンシャルを測定するには濃度が薄すぎるので、電気伝導度を測定してその浸透ポテンシャルを推定する。

試料に適当な量の純水を加えて（加えた質量を測定する）飽和にしてよくこね、濾紙の上に置いてサッカーで減圧して溶液を抽出し、この溶液の電気伝導度を伝導度計で測定する。多くの土壌溶液に対して、電気伝導度 EC と浸透ポテンシャルとの関係は次式でおおよそ与えられる。

$$\Psi_{OS} = -36 \text{ EC} \quad (9)$$

ここに Ψ_{OS} は抽出溶液の浸透ポテンシャルで J kg^{-1} 、EC は dSm^{-1} (mmho cm^{-1}) である。求めたい含水量 θ における浸透ポテンシャル Ψ_0 と含水量 θ_s において抽出した溶液の浸透ポテンシャル Ψ_{OS} との関係は次式で近似できる。

$$\Psi_0 = \Psi_{OS} (\theta_s / \theta) \quad (10)$$

低ポテンシャルの土（乾いた土）ではマトリックポテンシャルに比べて浸透ポテンシャルは小さいが、高ポテンシャルの上ではトータルポテンシャルに占める浸透ポテンシャルの割合が大きく、無視できない場合がある。水分特性曲線を求める場合、吸引法や加圧板法で測定するときのポテンシャルはマトリックポテンシャルであり、加圧板法とサイクロメータ法の測定値のずれは浸透ポテンシャルによって生じることに注意する必要がある。

7. 水分特性曲線の測定例

SC-10A および CX-1 を使って測定した水分特性曲線の例を図5に示す。図5は水分特性曲線の測定例である。2つの試料はいずれも米国ワシントン州のものである。飽和から-0.1 bar までを吸引法で、-5 bar までを加圧板法で測定し、-2 bar 以下を SC-10A で測定し、-100 bar 以下は CX-1 も使った。サイクロメータによる場合は、いろいろな水分量に調節した試料を作ってポテンシャルを測定し、その後、試料を炉乾燥して含水量を求めた。サイクロメータで測定したポテンシャルは、浸透ポテンシャルを差し引いてマトリックポテンシャルを求めてある。図6は、低ポテンシャルの曲線の形をよくみるために含水比軸も対数スケールにしたものである。

SC-10A によるデータは-2 bar 以下については加圧板法のデータとよく一致しており、SC-10A と CX-1 の測定もよく合っている。

8. 地中サイクロメータ

これまで実験室用のサイクロメータについて述べたが、現場で地中に埋め込む地中センサータイプも様々のものが試作されている。市販のものでは、Wescor 社のものを金木⁸⁾と岩間⁹⁾が本誌で紹介している。

地中サイクロメータ (in situ soil psychrometer/hygrometer) は、測定原理は実験室用のものと同様であるが、チャンバー内の相対湿度を周囲の土と平衡させなければならない。そのために、チャンバー壁面またはそ

の一部を素焼にして土壌水のポテンシャルと素焼内の水のポテンシャルを平衡させて測定するか、またはチャンパーに設けた穴を通して直接、土壌水のポテンシャルを測定するかいずれかである。後者では穴からチャンパー内に土が入らないようにステンレスや銀のスクリーンで穴を覆う。測定は、熱電対に冷却電流を与えて水分を凝縮させて湿球をつくり、温度測定に切り替えて湿球の温度低下を求めるか、または時分割冷却回路で露点を求めるかいずれかである。

温度勾配の大きい地中ではサイクロメータ内部に温度差が生じ、その影響の大きいことが最大の問題である。温度勾配の影響を最小にする地中サイクロメータの構造について、最近では Campbell³⁾ や Brunini⁴⁾ らがセンサーを試作して検討している。また Savage と Cass が野外用サイクロメータの総説⁶⁾ のなかで地中サイクロメータの構造や材質について総括している。これらによると、次のような構造がよいとされている。

- 1) チャンパーはなるべく小さく、構造は温度勾配(鉛直方向)に対して対称である(温度勾配に対して熱電対と同位置に土に通じる穴や素焼がある)こと。
- 2) 熱電対の線は伝導を小さくするために、直径0.025 mm の場合、付け根から接点までの長さを3 mm 以上とすること。
- 3) チャンパーの材質は、チャンパー内の温度差を最小にするために熱伝導率の高い方がよいとする説と、土との温度差による蒸発・凝縮を防ぐために小さい方がよいという説がある。
- 4) 土の水ポテンシャルに素早く反応するためにシリンダー状のチャンパーの側面をステンレス等のスクリー

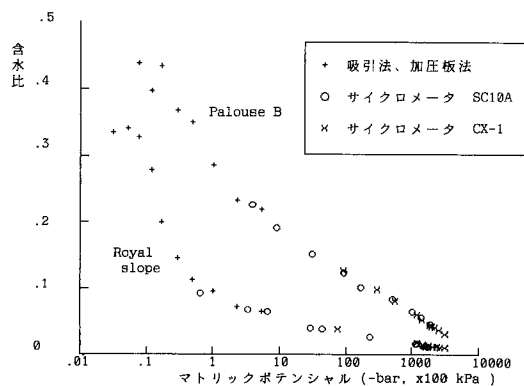


図-5 マトリックポテンシャルと含水比の関係
Relations between water content and matric potential

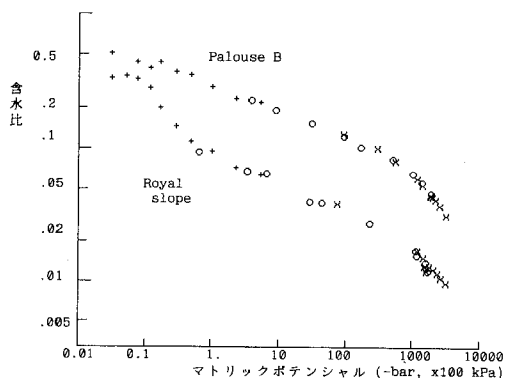


図-6 マトリックポテンシャルと含水比の関係
Relations between water content and matric potential

ンとすること。

市販のものは必ずしもこのような条件を満たすものではない。上記の条件を考慮したサイクロメータとして、筆者がG.S.Campbell教授の指導の下で試作した地中サイクロメータの構造(断面)を図7に示す。チャンパーは円筒形でステンレス製の台とこれにねじ込む蓋から成る。台には直径1 mmの2本のエナメル被覆銅線を通し、銅の先端に直径約0.02 mmのクロメル線とコンスタンタン線を溶接した熱電対が取り付けられてあり、熱電対接点(湿球)と取り付け部の温度差が測定される。蓋の側面には軸対象に4つの穴を設け、その外側を0.01 mmメッシュのステンレススクリーンで覆ってある。リード線(銅線)をサイクロメータ用のナノ/マイクロボルトメータ(Decagon社のNT-3やWescor社のHR-33T,または自動測定ならばCampbell Scientific社のマイクロデータロガー/コントローラ21X)につないで測定ができる。

この種のサイクロメータを作るには、やっと目で見えるほど細い線を溶接してきれいな熱電対接点を作り、これを銅線の台に固定するのに高度のテクニックとノウハウが必要である。地中サイクロメータのキャリブレーションも塩溶液を使って行なうが、実際に測定が行なわれる地中でのキャリブレーションができない(難しい)という問題がある。これまで現場で用いられた長期の測定

の例は温度勾配の小さい深層以外ではほとんどなく、現状では、地中サイクロメータは採土試料を測定するサイクロメータほどに実用的ではない。

おわりに

ここで紹介したSC-10AとCX-1はよくできたサイクロメータである。SC-10Aは高水分でも精度の高い測定が可能で、測定範囲も広い。CX-1は高水分の測定は苦手であるが、低水分での信頼性は高く、試料をセットするだけだから、これ以上に簡単な測定はない。熱電対サイクロメータで信頼性の高い測定をするには、測定の原理と装置の構造をよく理解しておくことが不可欠であるが、この点SC-10Aのマニュアル⁵⁾は丁寧に書いてある。

我国の土壌物理ではサイクロメータ法はそれほど一般的でないが、欧米では水ポテンシャルの標準的な測定法になっていることが、例えば米国土壌学会(SSSA)の測定法マニュアル(文献1)を見るとよくわかる。水分特性曲線の測定では、サイクロメータを使うことによって、とくに乾燥領域の水分特性を比較的容易に詳しく調べることができるようになった。これによって、土粒子表面への水分吸着や保水について、知見が深まることが期待される。

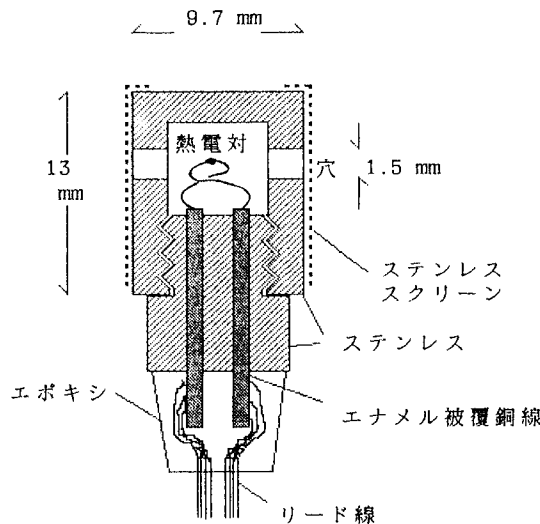


図-7 地中サイクロメータ
In situ soil hygrometer

引用文献

- 1) Rawlins S.L. and G.S. Campbell. 1986. Water Potential: Thermocouple psychrometry. Method of soil analysis, part 1. Klute A. (ed.). Soil Sci. Soc. Am. Inc., 597-618
- 2) Campbell G.S. and W.H. Gardner. 1971. Psychrometric measurement of soil water potential: temperature and bulk density effects. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35 : 8-12
- 3) Campbell G.S. 1979. Improved thermocouple psychrometer for measurement of soil water potential in a temperature gradient. J. Phys. E.: Sci. Instrument. 12 : 1-5
- 4) Brunini O. and G.W. Thurtell. 1982. An Improved thermocouple hygrometer for in-situ measurement of water potential. Soil Sci. Soc. Am. J. 46 : 900-904
- 5) Decagon Devices Inc. SC-10A Thermocouple psychrometer sample changer operator's manual.
- 6) Savage M.J and A. Cass. 1984. Measurement of Water Potential Using in situ Thermocouple Hygrometers. Adv. Agronomy. 37, N.C. Brady (ed.) Academic Press Inc., 73-126
- 7) 高倉直 1973 : Water potentialの測定 : 農業気象 28 : 33-36
- 8) 金木亮 1977 : サイクロメータについて : 土の物理性 36 : 34-36
- 9) 岩間秀矩・石井和夫・古畑哲 1981 : 熱電対露点計による水分ポテンシャル測定 : 土壌の物理性 36 : 2-7