

熱電対露点計による水分ポテンシャルの測定

岩間 秀矩*・石井 和夫**・古畑 哲***

An Examination of Thermocouple Dew Point Hygrometer for Measurement of Soil Moisture Potential

Hidenori IWAMA*, Kazuo ISHII** & Akira FURUHATA***

* Tropical Agriculture Research Center

** Tohoku Agricultural Experiment Station

*** National Institute of Agricultural Sciences

1 はじめに

土壌水分と平衡状態にある空気中の相対湿度の測定は、熱力学的にも最も正確な水分ポテンシャル測定法とされている。しかし、植物生育に係わりの深い pF4.2 以下の水分域では、相当する相対湿度は98%以上と殆んど飽和に近く、その変動幅も極めて小さい。そうした微小な相対湿度の変化は、微小な熱電対を用いたサイクロメーター法****によって試みられてきたが⁹⁾¹⁰⁾、極めて微妙な測定であるためにその利用は一部の研究者に限られてきた。これは、この種の測定においては百分の一度の温度差を測る精度が要求されることに加えて、サイクロメーター法が湿球部における水の蒸発に伴う温度降下量という、装置の形状や熱的条件による影響を受け易い物理量を測定していることに起因している。

それに対し、最近開発された熱電対露点計¹⁾による方法は、サイクロメーター法と殆んど同一のセンサーを用いているが、露点温度降下量という、より明確な意味を持つ物理量を測定しようというものであり、信頼性並びに実用性がより高いことが期待出来る。

熱電対露点計について、我国では既に高倉¹¹⁾により紹介され、作物体¹²⁾および土壌⁵⁾⁷⁾の水分ポテンシャルの測定が検討されてきた。しかし、土壌の水分ポテンシャル測定法として、この方法の持つ優れたいくつかの利点並びにその利用法について、我国の土壌水分研究者に充分認識されているとはいえない状況^{例えば7)}にあると思われる。そこで本報では当測定法の精度、測定条件等について検討した結果を報告し、さらに、当測定法との対比の結果、蒸気圧法に用いられる飽和中性塩溶液の

pF 値の一部に、訂正を要するものを認めたので報告する。

2 測定原理

露点温度降下 (ΔT)、熱起電力 (E) および水の化学ポテンシャル ($\Delta \mu$) の関係は次式で表わされる。

$$E = \alpha \cdot \Delta T = \alpha \cdot T \cdot \Delta \mu / \lambda$$

(α : 熱起電力の係数, T : 絶対温度, λ : 水の蒸発熱)

供試した Wescow 社製熱電対露点計による測定は次のように行なう。すなわち、密閉された試料室内の温度と蒸気圧とが平衡した時に、試料室内の熱電対接合部を Peltier 効果により冷却し、結露させる。次いで、冷却された熱電対に対して周囲から流入する熱量を、正しく打ち消すように冷却電流量を調節する。そのことにより、熱電対の温度変化は水分の蒸発もしくは凝縮のみによるという一種の理想状態が作り出されることになり、熱電対は自ずと露点温度に収束する。そして、その降下温度を熱起電力により測定するものであり、供試した装置では、 $\Delta \mu = 1 \text{ bar}$ につき $0.72 \mu \text{V}$ の出力であった。

Peltier 効果は次のように表わされる。

$$\text{冷却熱量 (} W_p \text{)} = \pi \cdot I$$

(π : Peltier 係数, I : 電流, 供試装置では 8 mA に設定)

冷却電流の調節は電流を脈流とし、一サイクル内において、実際に冷却電流の流れている時間割合 (L) を、熱電対の温度降下に応じて自動調整することによって行われる。

$$L = (\text{冷却電流 "on" の時間}) / (\text{全体の時間}) \\ = \Delta E / \pi_v = (\alpha \Delta T) / (\alpha \cdot \Delta T_{\text{max}})$$

* 熱帯農業研究センター研究第一部

** 東北農業試験場環境部

*** 農業技術研究所化学部

**** : サイクロメーターは乾湿球温度計の原理にもとづく湿度計を意味しており、露点温測定による湿度測定には適切な用語ではない。

Campbell ら¹⁾は両方を総称する用語として thermocouple hygrometer (metory) を用いている。

(π_v : 冷却係数, $\pi_v = \alpha \cdot \Delta T_{max}$ により定義され, 装置の最大冷却能を意味する.)

π_v は個々のセンサーによって, それぞれ異なる値を示す。ここで, 冷却され温度が ΔT 低下した熱電対に向けて, 周囲から流れ込む熱量 (水の凝縮を除いて) は ΔT に一次比例すると近似出来る。すなわち,

流入熱量 (W_s) = $K \cdot \Delta T = K \cdot L \cdot \Delta T_{max}$ (K : 比例定数)

また, 最大温度降下の際には冷却熱量と流入熱量は等しく次式が成立する。

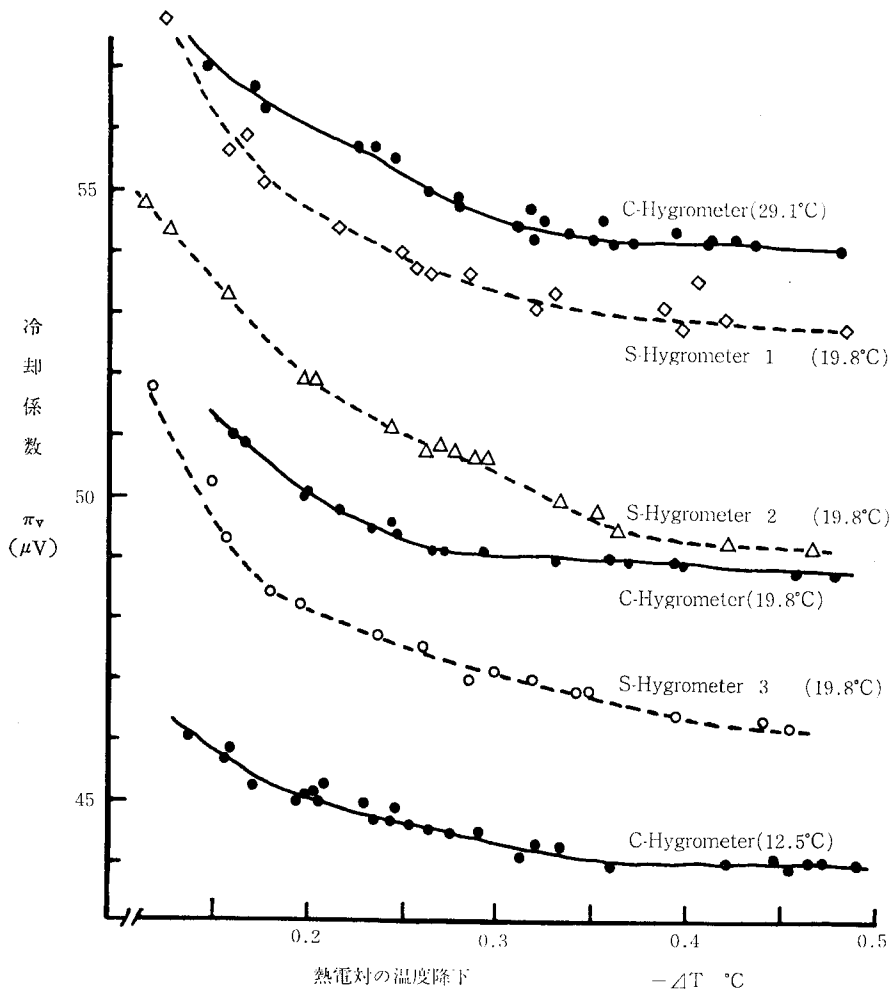
$$K \cdot \Delta T_{max} = \pi_v \cdot I$$

したがって,

$$W_s = K \Delta T = K \cdot L \cdot \Delta T_{max} = L \cdot \pi_v \cdot I$$

となり, π_v を正しく設定すれば流入熱量と冷却熱量は等しくなり, 前記理想状態を作り出すことが出来る。

したがって, 熱電対上に結露が生じない乾燥した条件 ($pF4.9$ 以上) では, 水の蒸発, 凝縮に伴う熱の出入がなく, 降下した熱電対の温度はそのまま一定に保たれることになる。 π_v の設定はこのことを利用して行われる。すなわち, 熱電対を適宜冷却後, $L = \Delta E / \pi_v$ が作動する回路に切り換えた際に, 温度が一定値を保つように π_v 値を調節することによる。



- — Chamber Hygrometer (at 12.5, 19.8, 29.1°C)
- ◇-△- Soil Hygrometer (at 19.8°C)

図一 冷却係数 (π_v) と設定時の温度降下

3 測定装置

今回供試した測定装置およびセンサーは、Wescow社製の Dew Point Micro volt meter (HR-33), chamber (thermocouple) hygrometer (C-51) および soil hygrometer (P-50) である。

チャンバーハイグロメーターは合成樹脂製容器内に微小な熱電対(導線の径: 0.0254mm)が取り付けられており、そこに少量のサンプル(土壌では200~300mg)をステンレス製容器に入れて挿入し、密閉して蒸気圧の平衡を待ち、測定を行なうものである。さらに、熱的安定性を高めるために容器内に金属塊が入っており、改良型では全体が金属製になっている。

ソイルハイグロメーターは熱電対を素焼き製カップの中に装着し、土壌中に埋設して測定を行なうもので、その概要は金木⁷⁾により解説されている。

4 冷却係数 (π_v) の変動要因

π_v は熱電対を構成する金属の組合せによって個有な値をとる Peltier 係数の他に、接合部の電気抵抗、形状あるは装置の熱容量など、個体差を生じる要因を包含しており、その正しい設定を行なうことにより、個体差要因を除いて一種の理想状態を作り出す重要な係数である。 π_v の変動とそれに伴う誤差の検討は当法の精度と同時に、測定原理に含まれるいくつかの仮定の妥当性をも検討することになる。

1) π_v の 設 定

図一は2節で述べた方法により、 π_v を設定する際における熱電対の温度降下 (ΔT) と、得られた π_v 値の関係を示したものである。その結果、熱電対の降下温度が小さいと π_v 値は大きく設定され、チャンバーハイグロメーターでは $\Delta T > 0.3^\circ\text{C}$ 、ソイルハイグロメーターでは $\Delta T > 0.4^\circ\text{C}$ においてそれぞれ一定となることが認められた。このことは「温度が低下した熱電対に周囲より流入する熱量 (W_s) が、温度降下量 (ΔT) に一次比例する」という仮定が、完全には成立しないことを意味すると思われる。すなわち、 $\Delta T < 0.3^\circ\text{C}$ では、 $W_s = K \cdot \Delta T$ における定数 K が相対的に小さく評価され、その結果、最大冷却能を意味する π_v 値が大きく設定されてくるものと思われる。したがって、当法による露点温度測定は一種の近似測定であり、標準溶液等によるキャリブレーションおよび以下に述べる測定条件の規格化が必要である。また、 π_v の設定は再現性から、 $\Delta T > 0.3^\circ\text{C}$ 即ち、 $\Delta E > 20\mu\text{V}$ 域に行なうことが良いと思われる。

ソイルハイグロメーターの π_v 値の変動がより大きいのは、チャンバーに比較し熱的安定性が劣ることによると思われる。

2) π_v の 温 度 変 化

図一には 12.5°C , 19.8°C , 29.1°C における π_v (チャンバー法) の測定例を示したが、 π_v 値は温度により直線的に変化することが明らかにされている¹⁾⁵⁾。その温度係数はチャンバー法では $0.62\mu\text{V}^\circ\text{C}^{-1}$ であったが、ソイルハイグロメーターでは個体差が多少あり、平均 $0.75\mu\text{V}^\circ\text{C}^{-1}$ 前後の値を示した。

3) π_v 値の変化が測定値に及ぼす影響

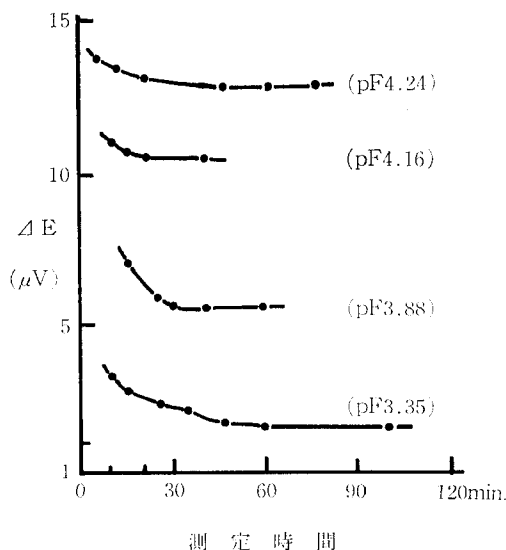
π_v 値の偏差が測定値に及ぼす影響を実測したところ、チャンバー法では $0.15 \sim 0.3\text{bars}/\mu\text{V} (\pi_v)$ と比較的小さかった。したがって、温度条件が 1°C 以上変るような場合に、 π_v の補正あるいは設定のし直しが必要となるといえよう。

5 その他の測定条件

1) 熱および蒸気圧の平衡

既に述べたように当法が測定する蒸気圧差および温度差は微小である。したがって、熱および蒸気圧の平衡をはかることは極めて重要である。特に測定器に与える温度変動は最小限に抑える必要がある。通常の研究室において容易に出来る温度制御法として、著者らは恒温室(設定温度 $\pm 2 \sim 3^\circ\text{C}$) 内に、二重ガラスの箱を置き、その中に測定器を置いて温度変動を緩和し、後記の測定精度を得ている。しかし、この場合でも恒温室に人の出入りが頻繁な場合には、測定値が $2 \sim 5\text{bars}$ も変動することを経験している。

図二は土壌サンプルをチャンバー内に挿入後における測定値の推移をみたものである。温度平衡は試料室内におかれた熱電対の零点示度が一定となることから確認



図二 土壌試料の平衡時間

され、ほぼ10分以内に達成されている。このことから、図2の ΔE の変動は主として蒸気圧の平衡過程を示しているといえる。その結果、土壌サンプルは30分以上の平衡時間が必要であり、高水分であるほど長時間を要することが判る。

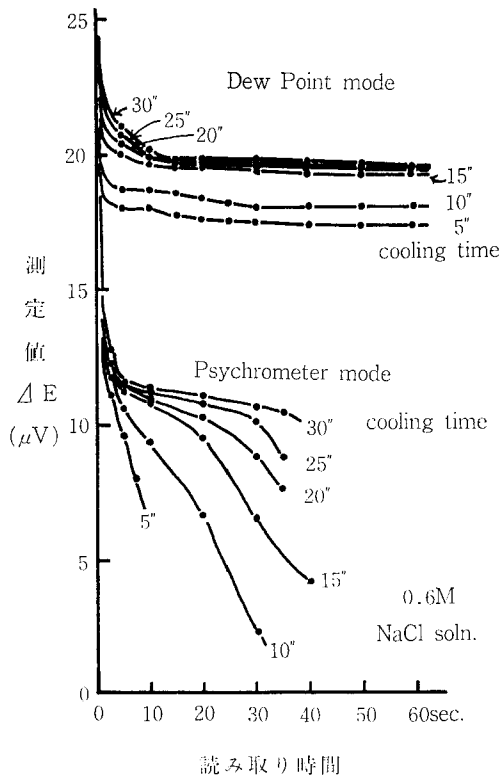


図-3 冷却時間および読み取り時間による測定値の変動

2) 冷却時間, 読み取り時間

熱電対を冷却して結露させる時間(冷却時間)あるいは測定過程に切り換え後の経過時間により測定値は変動する。測定例を図-3に示したが冷却時間が不足であると低い測定値(ΔE)が得られ、十分に結露させる必要が認められる。しかし、多湿なサンプルについて極少の温度落差を測定する場合には、長過ぎる冷却時間は誤差を生じる。したがって、測定値の大小に応じて冷却時間を調整・規格化する必要がある。著者らは測定値(ΔE) μV の数値に10を加えた秒数を冷却時間とし、読み取り時間は20~30秒後としている。

図-3にはサイクロメーター法による測定も例示してあるが、露点測定に比較しより不安定な測定であることが理解されよう。

3) その他の注意点

同一サンプルについて繰返し測定を行なう場合には、測定操作による攪乱の影響を避けるために、5分以上間隔をあける必要がある。また、多湿なサンプルの測定後、直ちに次のサンプルについて測定を行なうと、多湿側に偏った値が得られることが多い。さらにまた、熱電対およびチャンパー内の汚染は測定値に大きく影響するので注意を要する。

6 測定精度

1) チャンパーハイグロメーター

温度環境を5-1)に述べた方法により制御した条件下で、各種濃度の食塩水溶液⁹⁾を用いてキャリブレーションを行ない、同時に測定値の再現性についても検討を行なった。表-1には同一温度条件下でくり返し測定を行なった際における変動、および、異なる温度条件下で得

表1 測定精度

NaCl 水溶液 (標準液)		Dew Point meter の出力 (ΔE)		Chamber Hygrometer					Soil Hygrometer		
濃度	水分ポテンシャル	理論値*	実測値**	くり返し測定における変動			異なる温度条件下における測定値の再現性***		センサー間のバラツキ		
				n	σ	C.V.	σ	C.V.	n	σ	C.V.
Molality	bars	μV	μV		μV	%	μV	%		μV	%
1.0	-45.5	34.5	32.8	10	0.39	1.3	0.51	1.5	7	1.09	3.3
0.6	-26.9	20.4	19.4	10	0.31	1.7	0.20	0.8	8	0.53	2.6
0.4	-17.9	13.6	12.8	10	0.26	2.1	0.19	1.1	7	1.27	10.0
0.2	-9.0	6.83	6.62	10	0.09	1.4	0.17	1.9	6	0.71	11.1
0.1	-4.5	3.41	3.30	10	0.08	2.5	0.18	5.4	6	0.63	27.4
0.04	-2.2	1.67	1.65	10	0.08	4.7	0.07	4.2	8	0.44	43.3
0.02	-0.9	0.68	0.68	10	0.05	5.4					
0	0	0	0.28	10	0.06	21.4					

* $\Delta E = \alpha T / \lambda \cdot \Delta \mu$, ここで $\alpha = 63 \mu V K^{-1}$, $T = 272.8$, $\lambda = 24330 \text{ bars}$

$\Delta \mu$: 水分ポテンシャル bars として求めた。

** chamber 法による平均値

*** 恒温室全体の温度を12.5, 15.2, 19.8, 25.3, 29.1°Cに変えて測定値の変動をみたものである。

た測定値が同一標準曲線に乗るか否かについて検討した結果を示した。

その結果、 $-1 \sim -5$ bars (pF 3~3.7) 域では C.V. $< 5\%$ 、 $-5 \sim -45$ bars (pF 3.7~4.7) 域では C.V. $< 2\%$ の精度が得られ、また、 $12^\circ \sim 30^\circ \text{C}$ の範囲では殆んど測定精度は変わらないことが認められた。従って、チャンバー法では普通のエアコンがあれば容易に実現可能な温度制御下で、pF 3~4.7 の水分域のポテンシャルを高い精度で測定出来るといえる。

2) ソイルハイグロメーター

ソイルハイグロメーターのキャリブレーションは、土壌に標準食塩水溶液をしみ込ませ、その含水量を pF 2 相当に調整し、そこへソイルハイグロメーターを挿入して行なった。温度条件等はチャンバー法と同一である。表 1 にはセンサー間の個体差変動を示した。

この結果 pF 3~4 域における変動が大きく再現性に欠けることが認められた。

また、金木⁶⁾ はソイルハイグロメーターのキャリブ

レーションを塩溶液中にセンサーを浸して行なう場合と、水または塩溶液を加えた土壌中にセンサーを挿入して行なう場合とでは異なる標準曲線が得られることを報告している。この一つの要因として、著者らはソイルハイグロメーターはセンサー周囲の媒体が異なると π_v 値が若干 ($1 \mu\text{V}$ 以下) 変動することがあり、熱的安定性の劣るソイルハイグロメーターでは π_v 値の変化に伴う測定値 ΔE の変動もより大きくなる可能性があると推定している。いずれにせよ、信頼出来る測定域は pF 4 より乾燥水分側であり、さらに、変温条件下におかれる野外における測定は一層精度が低くなるといえる。

7 測定の応用例

主としてチャンバーハイグロメーターを用いた測定例について述べる。

1) 土壌の水分ポテンシャルの測定

遠心法、加圧膜法等は予め設定した水分ポテンシャル値に、土壌水分を平衡させるものであるが、この方法は

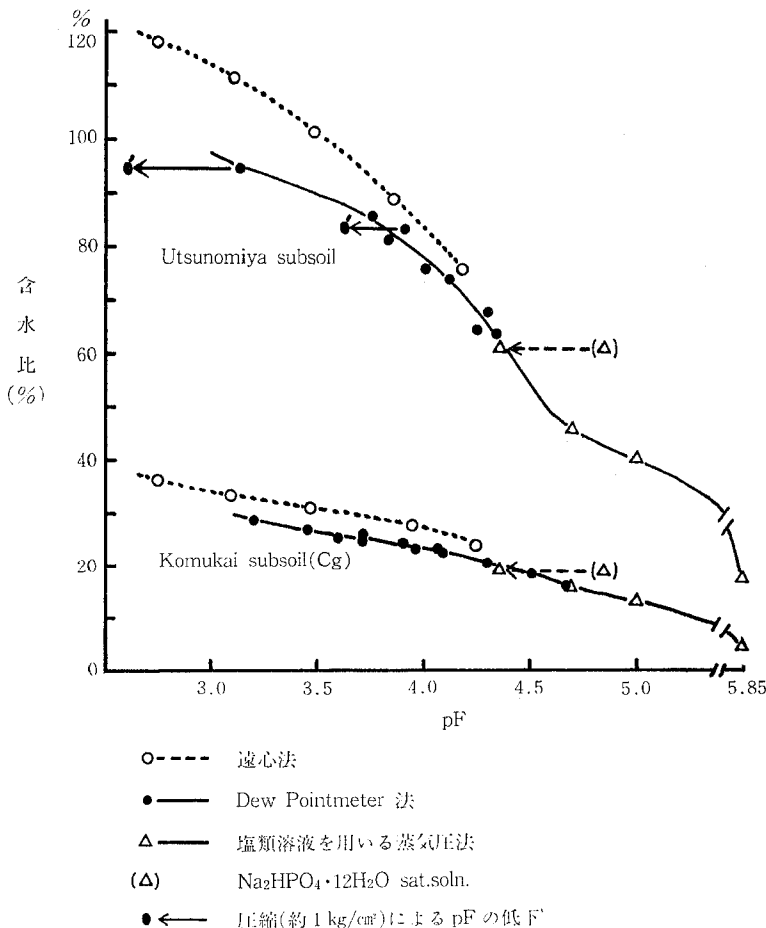


図-4 土壌の pF ~ 含水比曲線

pF 3.0~4.7の範囲内であれば特定しない水分ポテンシャル値の測定が可能である。したがって、上記測定法における平衡の確認や圃場から採取してきた土壌のpF値の直接測定が可能である。著者らは圃場から採取してきた土壌を手早く混合、細粒(3mm>φ)化し、内容積5~10ccの管ビンに密封した後、チャンパーハイグロメーターの置かれている箱内に一日以上放置して、温度条件を整えてから測定に供している。これによりテンションメーターの測定限界を越えて乾燥が生じた場合に、土壌水分ポテンシャルの推移を引き続き測定することが可能である。

また、塩類濃度が高い土壌の全水分ポテンシャルを測定することが出来る。

2) 土壌の力学的挙動の解明への応用

Campbellら³⁾は熱電対サイクロメーターを用いて、土壌の圧縮に伴う水分ポテンシャル変化を測定しているが、著者らは火山灰下層土(立川ローム)のpF~水分をこの当測定法により測る際に、ステンレス製小容器に入れた土壌をガラス棒で軽く圧縮($P \leq 1 \text{ kg/cm}^2$)すると、水分ポテンシャル値が顕著に低下することを見出した(図-4)。これはチキソトロピックな土壌を扱う場合に注意すべきことを示すと同時に、土壌のチキソトロピックな挙動を明らかにする有力な方法となりうることを意味している。

3) 蒸気圧法に用いられる中性塩飽和水溶液の相当pF値の一部訂正について

著者らは塩飽和溶液を用いた蒸気圧法により測定した水分値が、pF 4台において不規則な値を示すことに疑問を持ち、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ および $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 飽和水溶液の相対湿度を露点計を用いて直接測定した。その結果、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 飽和水溶液の相当pF値は4.85とされている⁴⁾が、実際には4.37付近であること、および $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 飽和水溶液の相当pF値は4.46とされているが実際には4.73付近であることをそれぞれ認めた。図-4中(Δ)により示した値は $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 飽和水溶液上にて平衡させた土壌水分の値であるが、これを

表2 飽和塩溶液の相対湿度および相当pF値(at20℃)

飽和塩類溶液	従来の値*		Dew Pointmeter による実測値	
	相対湿度	pF	相対湿度	pF
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ sat. soln.	% 95.0	4.85	% 98.3	4.37
$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ sat. soln.	% 98.0	4.46	% 96.1	4.73

* 土壤物理測定法⁴⁾による値

pF 4.37付近に移動させると、露点計法あるいは食塩水溶液上で平衡させて得られたpF~含水比曲線と矛盾しなくなることが認められる。

他の塩飽和溶液については測定していないが、pF 5以上においては相対湿度や氷点降下測定の誤差も少ないので、余り問題はないものと思われる。

8 ま と め

1) 熱電対露点計の測定域はpF 3.0~4.7であって、これまで余り良い測定法の無かった領域に相当している。この方法は土壌の水分ポテンシャルを直接測定し、かつ、全水分ポテンシャルを測定することが出来る。

2) 比較的容易に作り得る温度制御下で、チャンパー法により信頼度の高い測定が可能である。

3) 正確な測定には、 π_v の調整、冷却時間の規格化および標準液によるキャリブレーションが必要である。

4) この方法により、他の水分ポテンシャル測定法の正確さを確認することが出来る。また、チキソトロピーなど土壌の力学的挙動の解明に有効な手法となり得る。

5) 蒸気圧法に用いられている中性塩飽和水溶液のなかで、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ および $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 飽和溶液の相当pF値は従来4.85および4.46とされてきたが、実際には4.37および4.73であることを確認した。

謝 辞

本研究を行なうに際し、高倉直氏(千葉大、現東京大)、竹中肇氏(東京大)に御指導いただき、また、堤聰氏(東京大、現北里大)に蒸気圧法、他御指導いただいた。記して感謝の意を表わします。

引用文献

- 1) Campbell, E. C., G. S. Campbell and W. K. Barlow (1973): Agr. Meteorol. 12; 113~121.
- 2) Campbell, G. S. and M. D. Campbell (1974): Agron. J. 66; 24~27.
- 3) Campbell, G. S. and W. H. Gardner (1971): Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35; 8~12.
- 4) 土壤物理測定法委員会(1976): 土壤物理測定法. pp.155. 東京養賢堂.
- 5) 岩間秀矩・石井和夫(1974): 日本土肥学会講演要旨集. 20集. pp.2.
- 6) 金木亮一(1976): 滋賀短大学術雑誌. No.17. 42~46.
- 7) 金木亮一(1977): 土壤の物理性. 36号. 34~36.
- 8) Lang, A. R. G. (1967): Aust. J. Chem., 20; 2017~23.
- 9) Peck, A. J. (1968): Agr. Meteorol. 5; 433~447.
- 10) Spanner, D. C. (1941): J. Exp. Botany. 2; 145~168.
- 11) 高倉直(1973): 農業気象. 28; 33~36.
- 12) 渡辺和之・有原史二(1974): 日作学会東北支部会報, No. 16; 71~72.

(昭和56年12月8日受理)

Summary

The thermocouple dew point hygrometer appears to be superior to the thermocouple psychrometer for the measurement of vapor pressure values when the relative humidity exceeds 95%. The thermocouple dew point hygrometer (Wescow, Inc., Utah) was tested and used for the measurement of the soil moisture potential.

The results obtained are as follows.

1) The dew point meter can be used for measuring the total moisture potential of a soil with a pF ranging 3.0 to about 4.7.

2) Soil moisture potential can be measured accurately using a chamber dew point meter under a constant ambient temperature which can be easily obtained with standard air conditioning.

3) Accurate π_v -setting, standardization of the cooling time and of the reading time and calibration using standard salt solutions are necessary to carry out reliable measurements.

4) The dew point hygrometer can be used to check values of soil moisture potential determined by other methods such as the centrifuge, pressure plate and vapor pressure methods with salt solutions. It can be applied to study the changes of the soil moisture potential of thixotropic soils.

5) By using the dew point hygrometer, the pF values of saturated solutions of $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ which were listed in the literature as 4.85 and 4.46 became 4.37 and 4.73 respectively.