

土壌水分測定法の展望

丸 山 榮 三*

1. 序

土壌水分を正確に測定することは、植物の蒸発散や灌溉などの水分収支の問題や、水理学上の諸問題を処理する上から極めて重要である。これに対して近年 W.M.O. や C.I.M.O. の土壌水分の Working Group では各国にその精密な連続測定器の考案製作を呼びかけている。これまでその試作考案に幾多の努力が払われてはきたが、まだ完全なものではできていない。しかしここで一応これまでの測器や測定法について、記録可能不可能は論外として、それぞれの長所短所を検討し大方の参考供にしたい。

2. 土中水分量の表示

ところで土中の水分量は次の2種類¹⁾で表示されているが、ここで考えている測定法とはそれらの量が測定できるものであることを念頭におく必要がある。

a) 土壌含水量

$$1. \frac{W_w - D_w}{W_w} \times 100 = \text{対生重量表示 (\%)}$$

$$2. \frac{W_w - D_w}{D_w} \times 100 = \text{対乾重量表示 (\%)}$$

$$3. \frac{W_w - D_w}{W_v} \times 100 = \text{対容積表示 (\%)}$$

$$4. \frac{W_w - D_w}{W_v \times W} \times 100 = \text{対容水量表示 (\%)}$$

W_w ……土壌の湿ったままの重量

D_w ……土壌を 105°C 内外で熱乾した重量

W_v ……土壌の湿ったままの容積

W ……その土壌の容水量

第1の生重量に対する表示は除数の W_w を分析してみると、乾土と水分の重量の和である。したがって土壌が極端に異なる2種類の土壌中に同量の水分が入っていても表示した結果は同じにならない。たとえば粗砂のようなものは仮比重が 1.5 くらいであるが、火山灰土では 0.6 くらいの軽いものであるから、両者に同量の水分が入っていても、比重の大きい粗砂の場合の商は実際より小さく、火山灰土は著しく大きく計算される。第2の表示も同様である。第3の表示は以上の誤算を生じないため近頃多く用いられているが、植物の生理作用（特に吸水現象）におよぼす関係はなんら示されない。第4の容水量（土壌が自己の毛管力によって保持し得る量大飽水

量）を使った表示は、植物の生理的影響にほぼ一致するという点注目されるが、容水量の測定に難があり時間もかかる。大体植物に関係する土壌水分はそのすべてでなく、いわゆる有効水分（=含水量-萎凋係数）が問題ではある。しかし土壌水分の多少によって土壌の熱容量は大いに影響されるため、この含水量は気象学上から非常に関心が持たれている。

b) 蒸気張力(cm)……水柱または水銀柱の高さで表わされる。

農業上植物に必要な水分を扱う限りは、土壌水分が何%であるかということよりも、水分がいま植物に吸収される状態であるかどうか、そしてそれが量的であるかどうかということが必要である。ところで水で飽和しない土壌には毛管張力が働いていることは古くから知られていた。しかしその後土壌の物理的研究が進み土壌水分によって毛管張力は大きく影響されることが明らかになった。これは飽和状態以下の水分であるから、この圧力は負である。この力を力学的に示すと

$$P = \left\{ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right\} T \text{ もし } R_1 = R_2 \text{ であれば } P = 2T/R$$

である。

P は土壌粒子に吸着する水分吸着力（負）

R は土粒子間の水の皮膜の曲率半径

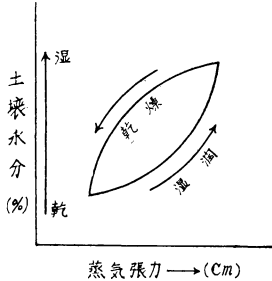
T は水の表面張力

すなわち土壌が乾燥してくると、土粒子の表面の水膜が薄くなって粒子間の凹面彎曲がいちじるしくなり、したがって R が小となり P は増大する。これを蒸気張力（水分吸着力）と呼び水柱の高さあるいは水銀柱で表示する。この数値を capillary potential と名づけ、1935年イギリスの Schofield がこの水柱の高さでは範囲があまりひろすぎるため、その対数値をとり、 pF と名づけた。以上のように土粒に吸着している土壌水分の毛管力をそのまま表わせば、植物に及ぼす作用はまず等しいと考えてよい。根が水を吸収するのは土粒子に対する吸着力より根の吸水力の方が大であるからで、いま土壌が乾燥し粒子間の水の皮膜の曲率半径 R が小さくなると吸着力 P が増大しついでには吸水力をしのぐようになると、植物の根は吸水能力を失いついには萎凋することになる。

また水理学上の問題である期間の土壌水分の変化や土壌含水量（表示 a）と蒸気張力（表示 b）の2つが同時に必要になってくることがある。しかし困ったことにある土壌についての両者の間には単一な関係が存在しない

* 産業気象課 丸山榮三

から、一方を決めても他方を正確に決定することはできない。つまり両者の関係は乾燥→湿潤→乾燥への変化過程で、hysteresisの閉曲線上あるいはその中の一点になるからである。ある蒸気張力に対応する土壌水分は、乾燥過程にある土壌では湿潤過程にある時よりも多くなっている。(第1図)



第1図 土壌水分と蒸気張力のヒステリシス効果による

いろいろの測器や測定方法によって求められる土壌水分と蒸気張力について、以上の関係も理解して貰う必要がある。有効な測定方法も土壌によっての適不適があるし、また土壌が均一でなければ得られる結果は代表的なものではない。たとえば石や砂を沢山含んでいたり、植物の根が多く混じっていても、正確な水分量は与えないだろう。

3. 重力法

イ。(乾燥法)。土壌の試料を105°Cで熱乾させ、その前後の重量を秤量する最も簡単な方法であるが、試料を採取する場合に土壌の自然状態を乱すのが欠点である。また平均値を得るためには幾つもの試量を測る必要があるし、しかも労力や時間の点で無駄が多い。しかし絶対測定法として他の方法のチェックに使われている。現在産業気象課技術係(千葉県柏市)では、この乾燥法をルーチン化²⁾して水分測定をおこなっている。

ロ。(多孔質ブロック法)。素焼または石膏で作ったブロックを土壌中に入れて、土壌と水分平衡に達した頃を見計ってブロックを取り出し乾燥器で乾燥して水分を決定する³⁾。これからは蒸気張力が決定されるが、土壌とブロックの間にはhysteresis効果が大きい。これに似た方法にソイル・ポンド法⁴⁾がある。

4. Tensiometer 法

土壌の蒸気張力を直接、連続測定しようというのである^{5,6,7,8)}。要点は水はとおすが空気はとおさぬ素焼製円筒を測定しようとする個所に埋設し、この中に一杯水を入れ上端の口には真空計(微圧計)をとりつける。土が乾けば水は中に入り微圧計内の水銀は上昇する。土が湿って土壌水の張力が水と平衡すれば、その水分に対する土中ポテンシャル(pF)は微圧計の示す値に等しいことになる。筒を出入する水の運動は筒と土中の水の張力

差に支配され、それは微圧計の水銀柱の高さの変化によって測られる。tensiometerの最大張力は1気圧を超えると空気が中に入り器械は動かなくなる。これは週囲の温度によっても影響され⁹⁾、かつhysteresisも相当大きく、同一微圧計の読みも乾燥時と湿潤時とで異なることは第1図に示した通りである。この方法は農業上灌水の目安としては有効に使用される。

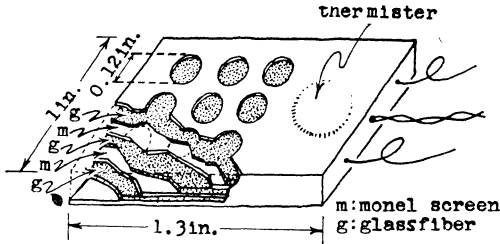
5. 土壌の機械的抵抗法

土壌は水分が増大すると可塑性を増すことを利用したもので、この種の測器にはstabilimeterとavailometerの2種類がある¹⁰⁾。前者は鉄棒の一端に探針がついていて、他端にはハンドルがある。このハンドルを廻して探針を一定の深さまで挿入する。その捩力の強さについて水分とcalibrationをしておく、捩力から水分が決定される。availometerは円筒の一端にpiston、他端に圧力計がついていて、円筒内には特殊な測器によって採取した土壌をつめる。それを標準の大きさまで押し縮めた時の圧力を調べる。別に圧力と水分の関係を求めておくことによって、圧力を水分に直すことができる。もちろん自記はできないし重い泥だけにしか使うことができない。これではわれわれの目的に沿うものとはいえない。

6. 電気的方法

(誘電法) 土壌と水分平衡にある多孔質ブロックの電気容量を測定して土壌水分を決定する^{11,12,13,14)}。この原理を使って早期に試みられたものに、2つの極板を土中に挿入しその抵抗を測定した。この場合一般に極板と土壌との接触抵抗の点で信頼がおけない。この欠点を補うための試みとして、4つの極板を使用しているが、限られた場合であるが成功している¹⁵⁾。Eastwell¹⁶⁾、(この報文はこの種の展開的な論議がなされている)は4つの極板を使って野外実験をおこなっている。最近KirkhamやTaylor¹⁷⁾も20%の誤差で水分測定に成功している。

1940年BouyoucosとMick¹⁸⁾は2つの極板を石膏ブロックの中に封じて土中に埋め水分を測定した。ブロックの塩類含量や密度は一定であるから、一度土中に設置して水分平衡に達すると實際上大して支障のない程度のTime lagで蒸気張力の変化に従う。一般にブロック中の電気抵抗は水分と同じく温度によっても変る。抵抗は電解や分極作用が起るから交流ブリッジで(通常1000サイクル)測定する。石膏は内部で硫酸カルシウムのイオン化による極度のイオン吸着が起る。それが土壌そのものの極板電解とは無関係に非常に大きい抵抗となる。近頃Colmanは土一単位抵抗法(Soil-Unit Resistance Method)で土壌中の水分を測定しているが、これには誘電体としてガラス繊維(fiber-glass^{19,20)}が使われている。一見丈夫で風乾から飽和までの水分範囲に適用される。ガラス繊維を使用した場合は、石膏などの多孔質ブ



第2図 Glassfiber Moisture Unit
(Colman による)

ロックに比べて time lag が小さく、イオン吸着や極板の電解作用は起きないのが有利である。これらはいずれも蒸気張力の測定に使われるが、最も有効な適用範囲は石膏ブロックの場合で水柱の高さで 1000cm 以上、ナイロン・ブロックでは 100cm 以上の蒸気張力の測定に適している。土壤水分の測定にはこれらの方法はいずれも hysteresis が大きいので適当ではない。また蒸気張力と土壤水分の calibration をする場合、土壤温度と密度を考慮する必要がある。Colman の方法は thermister によって温度補正がされている。

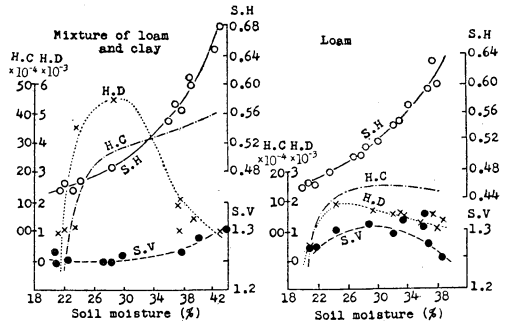
これらのブロックを使った方法で、水分収支などの問題に適用した場合に量的な結果が得られるかという点に疑問はあるが、自記記録も容易にできそうだし、今後の発展が期待される。

7. 温度法

イ。(熱伝導法)。土壤の熱伝導度は土壤水分が増せば大きくなるから、もし熱伝導度が測定できれば実験室的に水分と伝導度との関係が得られる²¹⁾。もちろん土壤の密度に関係し温度にも幾分影響される。これまで2つの方法が採用されているが、その1つは^{22,23,24)}ガラス棒に銅線を捲いてこれを土中に埋め、一定の熱量を供給する。熱が土壤の熱伝導による loss と平衡になった時の銅線の抵抗によって水分が見積られる。第2番目の方法²⁵⁾は土壤中に埋めた釘のような物質に既知の熱量を与えて、その付近の温度分布を熱電対で測定すると、熱伝導度は温度と時間の関係曲線から求められる。ただこの方法は熱源と土壤との間で熱接触が悪いと具合が悪い。

(土壤が縮むような場合) 飽和に近い土壤だと精度が落ちるが、容水量から萎凋点の範囲まで良くつかえる。石膏のような媒介物を使った時のような time lag は起きないし、これを使って記録もできる²¹⁾。少量の土壤に対しては好結果が得られている。

ロ。(熱容量法)。Albrecht²⁶⁾は熱伝導度と温度伝導度Kを同時に決定することによって土壤水分を決定することができることを暗示した。単位熱量 $\rho \cdot C = \frac{\lambda}{K}$ で決り、単位容積に対する熱容量は水分量の直線函数であり、土壤の乾燥密度が一定で水分含有量が大きく変化する場合、もし温度伝導度が小さければ、温度伝導度はかなり



第4図 土壤水分と比熱 (S.H), 温度伝導度 (H.D), 熱伝導度 (H.C), 比容 (S.V) との関係 (丸山による)

精密に測定する必要がある。丸山²⁷⁾は実験的な方法により土壤水分と比熱、比容、温度伝導度を求め、それらから熱伝導度を計算してそれらの関係曲線を求めた(第3図)。

8. 中性子散乱法

この方法は土壤中の水素原子核が、Po や Be の放射性物質から出る早い中性子を、散乱させたり遅らせるということに基づいている。この散乱された中性子はカウンターで探測される。これは水素原子核が早い中性子を遅らせるのに有効であることと、土中の水素原子核の大部分は水の中にあるということによる(泥炭地の場合は例外)^{28,29)}。この方法で一定容積中の中性子を探測して、水分を決定するのであるが、その場合探測に使う土壤の一定量はそれに含まれている水分によって変えねばならないのが欠点である。早期の調査³⁰⁾によると水分を多く含んでいる土壤では約30cmの直径の球、少いと80cmの直径の球に相当する土が必要とされている。calibration は土の密度や種類には無関係で自記させることもできる。

9. 結論

精密に土壤の水分量を測定する完全な方法は、自記可能なものはもちろん、記録しないものでも現在はまだ見出されていない。わずかに実用できるのは2・3にすぎないし、水分収支の調査に充分使用できそうなものは今の所ない。それでも電気抵抗を使う方法は蒸気張力や水分を品質的にもまたかなり数量的なものとしても使えそうである。費用も大してかからない。

熱伝導度の方法は乾燥密度が一定な非圧縮な土壤の水分測定には数量的な結果を与える。しかしこの方法は骨が折れるし熟練も要する。

中性子分散法は比較的大量の土壤の水分を測るには適しているが、複雑でもあり費用もかかる。

精密な数量的な測定や水分のプロフィールを決める場合などには乾燥法は都合がよいが、数多くの資料を秤量す

るのに非常に骨が折れ、ルーチンとしては不適當である。
これ以外に簡易測定法に類するものを日下部が紹介しているが、いずれも連続測定はできない。(2, 31)

参 考 文 献

- 1) 寺田喜助, 丸山節夫 1954.: 土壌水分の表示と測定, 林, No. 23. 北海道林務部.
- 2) 日下部正雄, 1951: 土壌水分の観測法について, 農業気象, Vol. 5. 1,
- 3) Richards, L. A., and L. R., Weaver, 1943 : The Sorption Block Soil Moisture Meter and Hysteresis Effects, Jour. Am. Soc. Agron. Vol. 1, 35.
- 4) Livingston, B. E., and Riichiro Kôkêtsu, 1920: The Water-Supplying Powder of soil as Related to the Wilting Plants, Soil Soc. 9.
- 5) Richards, L.A., M.B., Russell, and O.R.Neal, 1937: Further Developments on Apparatus for Filed Moisture Studies, Proc, Soil Sci. Soc. Ame., Vol. 2.
- 6) Velhmeyer, F. J., N. E., Edlefsen, and A. H. Hendrickson, 1943 : Use of Tensiometers in Measuring Availability of Water to Plant, Phys. Vol. 18.
- 7) Scofield, C. S., 1945: The Measurement of Soil Water, Jour. Agr. Res., Vol. 11.
- 8) Richards, L. A., 1942: Soil Moisture Tensiometer Methods and Construction, Soil Sci. Vol. 53.
- 9) Haise, H. R., and O. J. Kelley, 1950: Causes of Diurnal Fluctuation in Tensiometers, Soil Sci. Vol. 70.
- 10) Allyn and Work, 1941: Availameter and Its Use in Soil Moisture Control, (I) The Instrument and Its Use, (II) Calibration Method, Soil Sci. Vol. 51.
- 11) Anderson, A. B. C., 1947 : A Method of Determining Soil-Moisture Content Based on the Variation of the Electrical Capacitance of Soil, at Low Frequency, with Moisture Content, Soil. Sci. Soc. Ame.
- 12) Thorne, M. D., and M. B. Russell, 1947 : Dielectric Properties of Soil Moisture and Their Measurment, Proc. Soil Sci. Soc. Ame.
- 13) Wallihan, E. F., 1947: Studies of Dielectric Method of Measuring Soil Moisture, Proc. Soil Sci, Soc. Ame. Vol. 12.
- 14) Shaw, C. F., and L. D., Baver, 1939: Heat Conductivity as an Index of Soil Moisture, Jour. Ame. Soc. Agron., Vol. 31.
- 15) McCorkle, A. S., 1931 : Determination of Soil Moisture by the Method of Multiple Electrodes, Tec. Agric. Expt. Station Bull. No. 4261.
- 16) Eastwell, B. A., 1953 : In-Situ. Methods for Measuring Soil Moisture Content—A Critical Resume, Elec. Res. Assn. Tech. Rpt. W/27.
- 17) Kirkham and Taylor, 1949: Some Tests of a Four-Electrode Probe for Soil Moisture Measurment, Soil Sci. Ame. Proc. Vol. 14.
- 18) Bouyoucos, G. I. and Mick, 1940: An Electrical Resistance Method for the Continuous Measurement of Soil Moisture under Field Conditions. Michigan Agric. Expt. Station Tech. Bull. No. 172.
- 19) Colman, E. A., and T. M. Hendrix, 1949: The Fiberglass Electrical Soil Moisture Instrument, Soil Sci. Vol. 67.
- 20) Bouyoucos, G. J., 1952: Methods of Measuring the Moisture Content of soils under Field Conditions, Highways. Res. Board. Special Rept. No. 2. Washington.
- 21) Van Duin. R. H. A. and de Vries, 1954: A Recording Apparatus for Measuring Thermal Conductivity and Some Results Obtained with it in Soil, Neth. Jour. of Agric. Sci. Vol. 2.
- 22) Shaw, B. and L. D. Bauer, 1939: An Electro—Thermal Method Following Moisture Changes of Soil In-Situ, Soil Science Ame. Proc. Vol. 4.
- 23) 谷信輝, 1950.: 気象台農業気象部の新測器の実験技術の研究, 農気, Vol. 6, 1.
- 24) 久保次郎, 1952.: 新土壌水分測定法, 産調. Vol. 16.
- 25) De Vries, D. A., 1952: A Non-Stationary Method for Determining Thermal Conductivity of Soil in Situ, Soil Sci. 73.
- 26) Albrecht, F., 1949.: Die Weiterentwicklung Messtechnik des Wassergehalts des Bodens auf Thermischer Grundlage, Arch. Met. Geophys. Bicklim, Serie B, Vol. 1.
- 27) 丸山榮三, 1957: 土壌水分と比熱, 温度伝導度, 熱伝導度, 比容との関係, 産調, Vol. 20. 3.
- 28) Gardner, W., and D. Kirkham, 1952: Determination of Soil Moisture by Neutron Scattering, Soil Sci. Vol. 73.
- 29) Belcher, D. J., T. R. Cuykenall, and H. S. Sack, 1950: The Measurement of Soil Moisture and Density by Neutron and γ -Ray Scattering, U. S. Civil. Aero. Adm. Tech. Dev. & Eval. Center Rept. 127. Indianapolis.
- 30) Beicher. D. J, 1952: The Measurement of Soil Moisture and Density by Neutron and γ -Ray Scattering, Highway Res. Board Special Rept. No. 2. Washington.
- 31) 日下部正雄, 1952 : 土壌水分の迅速測定法について Papadakis 法の小改良, 産調. Vol. 16, 1.