

森林土壌の土壌水分に関する研究 (第1報)

長期にわたる野外の土壌水分測定用装置の
考案と若干の測定例吉 岡 二 郎⁽¹⁾

Jirô YOSHIOKA : Studies on Moisture Status of Forest Soils Part 1
A proposition of a ceramic block apparatus for long-term soil moisture
measurement in the field and some results

要 旨：森林土壌の野外における土壌水の長期にわたる変動の実態を明らかにする目的で、素焼固体を使用したテンションメーターを考案製作し、実験室における予備試験と野外適応試験を兼ねた現地観測を実施した。

1. 予備試験：テンションメーターの機構上重要な条件である気密性、土壌水の変化と負圧発生との関係、および素焼固体の具備すべき条件等について検討した。試験の結果、気密性および負圧の発生状態はほぼ満足され、素焼固体の条件も決められた。

2. 野外適応試験：2地域（京都市、和歌山県下）、4観測点を設け、各観測点とも同一土壌断面の地表面から、15 cm、30 cmの各位置に素焼ユニットを埋設して、3日目ごとの測定を実施した。

1) 装置は約2か年間経過後も順調に作動し、長期にわたる観測に耐えることが実証された。

2) 土壌水の変動は降雨と密接な関係を示し、いずれの観測点でもpF値は降雨によって低下した。pF値の変動範囲はBb型、Bb(d)型、Bd型およびBe型の各土壌では約1.0~2.8の範囲であることが観測された。

3) 乾性型土壌と湿性型土壌では土壌水のpF値に明らかな相違が認められた。乾性型の土壌ほど高いpF値を持続する期間が長く、降雨による変動幅が大きく、土壌断面上部より下部のpF値が高い値を示した。これらの現象は乾性型の土壌の一般的特徴であるように推測されたが、これについては、今後土壌の履歴効果(hysteresis effect)とも関連して検討し、次の機会に結論を得たいと考えている。

4) 以上の結果から、この装置は野外における土壌水分の状態を長期にわたって測定するために効果的で、実用に供し得ると判断した。

I は じ め に

わが国の森林土壌調査で用いられている土壌の分類体系は、大政⁹⁾のブナ林地帯の土壌の研究によって確立された。この分類は、地形の相違にもとづく小気候の差、とくに、土壌の水分環境の相違によって特徴づけられる土壌の性質に準拠している。

自然土壌の水湿状態は、降雨等の一時的な気象の変化によって変化するとしても、その変化の仕方や土壌の保有水分量などは、地形上の位置のちがいはじめ、地域気候などの影響をうけて、それぞれの地点で固有の特徴をもっているものと考えられる。また、このような土壌の水分環境の相違は、土壌中の物質の代謝や土壌水の動きによる物質の移動とも関連して、各土壌の生成過程に対して大きな影響を及ぼし、同時に各土壌の理化学的性質の相違をもたらしていると考えられる。

今までに行なわれた国有林土壌調査や適地適木調査の結果では、褐色森林土や黒色土の各種土壌型における主要造林樹種の生育に大きな相違が見られ、同時に大きく見ると乾性型土壌から湿性型土壌にかけてかなり規則性のある相違が示されている。このことは、各土壌の水分環境の相違は主として落葉の分解に

よる林木への養分の供給と、林木自体の生理的に利用しうる土壤水分の量の相違によるものと考えられている。

各土壤型の水分環境の相違は土壤断面の形態的特徴から推定され、また、野外観察の結果から定性的に裏付けされているに過ぎない。真下⁷⁾⁸⁾ および山谷¹²⁾ は主として同じ季節や季節別に、林地から多数の土壤試料を採取して土壤水分を測定し、各土壤型の水分環境に相違があることを立証しているが、これらはいずれも同じ土壤について継続的な変化を測定したものではない。

土壤の水分環境の実態を明らかにすることは、土壤生成および分類の立場から、土壤の生産力を解明するためにもきわめて重要な問題と考えられる。このような目的のためには、土壤中の水湿状態はある調査時期における静的な把握では十分でなく、年間を通じて季節的な変化や降水等による一時的な変化等の実態を、動的に把握することが強く要望されている。後述のように、過去においては寺田により、最近では井上および岩川⁹⁾、有光および松井¹¹⁾ によってこの種の測定が試みられているが、まだ十分に目的を達するに至っていない。

筆者は野外において、土壤水の pF 価を長期にわたり継続的に測定して、その変動の状態を明らかにする目的で素焼固体を使用した水分測定装置（テンションメーター）を考案した。実験室での予備試験と約 2 年間にわたる野外適応試験を兼ねた観測を行なった結果、この装置は所期の目的をほぼ満足し、実用に供し得ると判断されたので、土壤水分の研究の第一段階として測定装置の開発に重点をおき報告することにした。なお、山地における森林土壤の水分に関する特徴の解明については、測定点をさらに増して多数の資料を検討し、後日とりまとめて報告する予定である。

この研究を進めるにあたり、林業試験場土じょう部研究顧問大政正隆博士から多大の有益なご高見をたまわった。土壤水分全般についてのご助言を林業試験場土じょう部土じょう第 3 研究室長真下育久博士から、野外観測については和歌山県林業試験場、京都営林署のご協力をいただいた。和歌山県林業試験場長北野正二氏、前場長山田静男氏、中島宗昭技師には観測と装置の保守に多大のご協力と便宜を与えていただき、林業試験場関西支場土壤研究室長河田 弘博士には適切な助言を、また、研究員西田豊昭技官には装置の製作に多大の助言と協力をいただいた。

以上の各機関ならびに各位に対して心からお礼を申しあげる。

II 研究の背景の概要

土壤水分の研究は、主として植物の生育環境として植物生理学的に行なう場合と、土壤の諸性質や土壤生成に関与する水として、土壤の理化学性を通じて土壤学的立場から研究するものとに大別することができる。

土壤水の研究は、土壤に含まれる水の量を対象としたものから始められ、その後しだいに圃場容水量、水分当量や萎凋点における水分のように、作物の管理上必要とされる水を土壤の理学的性質とともに扱うことによって、土壤水の究明と位置づけがなされてきた。しかしながら、土壤水の性質を表示する基準については、多種多様の提唱があり、しかも適當のものが少なかったために折角明らかにされた土壤水の諸性質も、普遍的なものとして扱うには無理があり、不都合の点が多かった。SCHOFIELD¹⁰⁾ (1935) が pF 価による水分の表示法を提唱して以来、この表示法は広範囲にわたる土壤水の状態を、無理なく表現できる方法として広く用いられ、同時に pF 価の測定法にも創意くふうがなされてきた。

わが国の森林土壌の水分に関しては、大政および真下¹⁰⁾は各土壌型の土壌水の pF 値を測定して、乾性土壌とくに Ba 型土壌では土壌水の pF 曲線に強い履歴効果(hysteresis effect)があることを認め、この現象を土壌の理化学性と吸水性の関係から証明した。また、かれらは pF 値の測定法についても研究をすすめ、採土円筒を用い自然状態の試料について、土壌水の pF 値を測定できる隔膜吸引装置を考案した。真下は各土壌型の自然状態の土壌水を隔膜吸引法で測定して、野外における各土壌型の水湿状態の相違を明らかにすると同時に、土壌の理化学性との関係を究明して林木の成長について解析した。山谷¹²⁾は津軽半島に分布する天然生ヒバ林土壌の含水量を月別に測定して、土壌水分の季節的变化と土壌および気象条件の関係について報告している。寺田は素焼カップをユニットとしたテンションメーター方式の簡易水分計を考案した。この装置は、苗畑灌水の指示を目的とした簡略した圧力表示であり、また、土壌層位別に目的とした部位にユニットを正確に装填することは困難であるので、林地の土壌水分変動の研究には活用しがたい。有光および松井¹¹⁾は細菌ろ過管を利用したテンションライシメーターを考案して、土壌中の水の動態とその水の化学的性質について研究し、傾斜地における pF 2.0 以下の土壌水の採取法を確立すると同時に、水の動態の観測をも可能にした。井上および岩川⁸⁾はテンションメーター法を用いて、土壌型の異なる森林下の土壌水を測定して、pF 値の日変化と各土壌型の関係を求め、とくに pF 値の変動に影響する最低降水量を明らかにしている。

以上の概要にもみられるように、土壌水に対する考え方やその解析手段は静的手法から、変動する土壌水に対応できる動的手法に発展してきた。

III 測定法および装置に対する考え方

土壌水分は土壌中の孔げきに保持されていて、その保持のされ方は孔げきの細粗の組成や土性など、主として理化学性に左右される。これらの理化学性がちがえば含水率が同じであっても、土壌の湿り程度や水の移動の難易などの性質は異なってくるので、土壌水の表示にあたっては、その表示された値がよくその水の性質を表現し、しかもその基準は普遍的性質のものでなくてはならない。

Ковнер⁵⁾(1968)は、土壌中に保持される水のうち、重力水の一部や非遊離水を除いた部分は pF 1.7~4.5 に相当し、その移動は毛管孔げきを通じて行なわれるが、これらのうち、pF 2.5~4.5 の水が毛管水にあたり、pF 2.5 以下の部分は重力水であるとし、重力水のうちでも pF 1.7~2.5 に相当する部分の水は、毛管孔げきを通じて移動するといっている。土壌中の水の移動は水に働いている毛管張力に不平衡が生じた場合に、低張力側から高張力側に向かって起こり、張力が平衡状態になったとき停止する。

毛細管中を水が移動しているとき、移動方向と反対側の毛細管の一端を閉じたと仮定すれば、その閉鎖管内には水の移動にともなって負圧を生ずるはずである。この負圧の強さは毛細管の半径に反比例し、毛管張力に比例するものであるから、土壌水の保持されている状態(水湿状態)はこの発生する負圧を測定すれば、かなり明確に表現することができる。しかしながら、土壌中に形成されている毛管孔げきは質的および量的にも均一なものではなく、非常に複雑な構造であるため、毛管孔げき内の張力を直接測定することは至難である。そのため、従来から間接的に土壌水分の測定が試みられてきた。その中で野外に適用されてきた代表的な方法として、次の2種類があげられる。

1. 電気伝導法

土壌中の水分を直接電氣的に測定する場合には、水に溶解している塩類などの影響が大きいため実用に

はならない。そのため、土壌と石コウ固体やガラスウールなどの吸湿体を接触させて、吸湿体の吸着水と土壌水分を平衡させ、吸湿体の電気伝導度から水湿状態を測定する方法である。これは Bouyoucos and Mick²⁾ (1940) によって代表される方法である。

2. テンションメーター法

多孔質体の吸水性および透水性を応用して、土壌中の水分と土壌と接触させた多孔質体の水分を平衡させる。この時多孔質体に作用している張力から水湿状態を測定する方法である。この方法については、すでに各種の装置が考案され、圃場の水分管理などに応用されているものもある。

この両者には測定機能に特徴があり、測定可能な水湿状態の範囲もそれぞれちがっている。前者は比較的乾いた状態に効果的で、pF 2.5 以下の状態には適当でない。後者は、湿った状態とはよく反応するが、乾きの強い状態には適当でなく、測定可能な最高値は pF 2.8~2.9 付近である。

わが国の森林下の土壌の水湿状態は真下⁷⁾⁸⁾、井上⁹⁾ らによれば、とくに強い乾燥の影響を受けた土壌を除けば、pF 3.0 以下の状態におかれていると考えられるので、土壌水分の主な変動は、テンションメーター法で測定可能な範囲にあると考えられる。テンションメーターで測定可能な理論値は最高 pF 3.0 であるが、実際には多孔質体の性能等に影響されて pF 2.8 付近が限界になることが多い。これ以上の高い pF 値の測定を必要とする場合には、テンションメーター法以外の方法を用いなければならない。

テンションメーター法で取り扱われる圧力はすべて負圧であり、装置内の負圧は 0~(-) 600 mmHg (pF 0~2.8) の広い圧力範囲におかれるので、高度の気密性と耐負圧性が必要である。また、土壌水分の変化は多孔質体を通じて間接的に測定されるので、水分変化に対して、敏感で確実に反応する多孔質体を選択しなければならない。

多孔質体の素材としては素焼カップ、素焼円筒や石コウ固体がよく利用されるが、素材の材質や形状のちがいでその作動状態が異なるようである。石コウ固体は加工は容易であるが、均質な固体が得がたいうえ耐久性に劣っている。とくに耐酸性に劣るため、わが国の森林土壌のように一般に酸性の土壌水では、徐々に溶解して機能を失う結果となり、長期にわたる野外観測には適していない。素焼固体は石コウ固体より加工にやや難点はあるが、固体内孔げきの粗密の調節が窯製の際可能で、均質の固体が得やすいうえ耐久性にもすぐれ、多孔質体としての条件を備えた素材である。ただし、いずれにしても、孔げきの粗密や孔径の大きさ、および多孔質体の形状にともなう厚さなどの相違によって毛管張力の強さが変わり、透水性や耐負圧性*が変化することから使用上の適性を決める際にくふうが必要である。

以上のようなことから、測定装置に必要な条件を要約すると次のとおりである。

- 1) 土壌水の中で気象変化に比較的すみやかに反応して増減し、植物にも有用といわれている pF 3.0 以下の状態にある土壌水を測定の対象とすること。
- 2) 土壌の水湿状態の表示には pF 値を用いるのが適当で、水分測定法としては土壌水の変化を圧力変化として検出することができ、さらに、低張力状態の土壌水の測定に適しているテンションメーター法を採用する。
- 3) 測定装置は野外で長期にわたり使用することが主目的であるから、強度および耐久性にすぐれ、構造や操作が簡便なることが望ましい。とくに、測定装置の機能を決定する多孔質体には素焼固体を用いる

* 耐負圧性：飽水した多孔質体を吸引した場合、吸引圧により毛管水が切断されて水の移動が停止し、多孔質体が通気性を有するようになる。毛管水の保持能力（毛管張力）を耐負圧性と仮称した。

のが有利である。

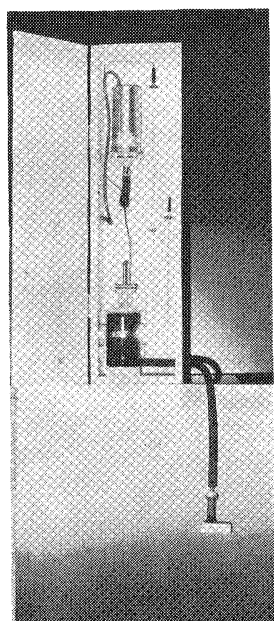
IV 測定装置

IV-1. 装置の機構

IIIで述べた考え方にもとづいて筆者が考案製作した測定装置は Phot. 1 に、またその機構の概略は Fig. 1 に示したとおりである。この装置は次の3つの主要部分から構成されている。

1) 素焼ユニット [Fig. 1 の4の部分]

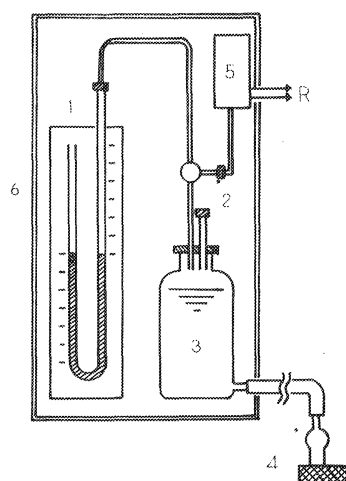
この部分は Phot. 2 および Fig. 2 に示すように、素焼固体とガラス球管で構成している。このユニットは土壌中に埋設されて、土壌と測定装置とを毛細管によって結合させる機能を持ち、もっとも重要な役割りを果たす部分である。この部分の作動状態の良否によって、装置の性能はほぼ決められる。素焼固体の孔げきは細かいほど高張力に耐え、土壌との毛管連絡は維持されやすいが、あまり細かいものは透水が悪く、土壌水の変化に対する反応がおそいので適当でない。また、孔げきがあまり粗大になると反応はすみやかであるが、固体内の毛管水が低張力の状態で切れて、土壌水との毛管連絡が断たれて通気し、測定不能となる欠点がある。このようなことから、この装置に使用した素焼固体は、pF 値約 2.7 の負圧下で毛管連絡の維持できる素焼板を選択して、切断加工して製作した。表面積は約 72 cm^2 ($3 \times 6 \times 2 \text{ cm}$) である。素焼固体とガラス球管との接合は、両者の接合面を研磨平滑にしたのち、金属用接着剤で接着固



Phot. 1 水分測定装置

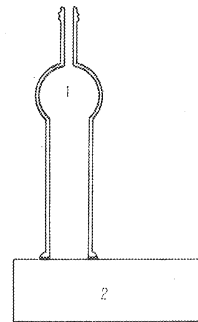
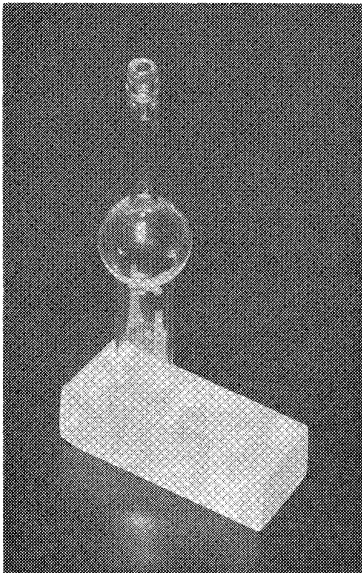
（写真用のため、貯水ビン中に
黒色インクが添加されている）

The ceramic apparatus (The water in stock bottle is black colored by ink for clear photograph, not to practical use).



1. 水銀圧力計 Mercury manometer, 2. 注水栓・圧力電圧変換器接続栓 Plug of water leveled and for transducer, 3. 貯水ビン Water stock bottle, 4. 素焼ユニット Ceramic unit, 5. 圧力電圧変換器 Transducer of pressure-voltage, 6. 収納箱 Box, R. 記録計用コード Recorder cord.

Fig. 1 水分測定装置機構概略図
Diagram of water measurement apparatus.



1. ガラス球管 Glass tube
2. 素焼固体 Ceramic solid

Fig. 2 素焼ユニット
Ceramic unit.

Phot. 2 素焼ユニット
Ceramic unit.

定した。接着部の周囲 1 cm 幅には気密性の保持および接着部保護の目的で、耐水性塗料の塗布を行なった。

2) 貯水部 [Fig. 1 の 3 の部分]

この部分は貯水ビン、注水栓、圧力計接続用管および圧力電圧変換器接続栓で構成している。貯水ビンはこの装置の中心になっていて、各部分はすべて貯水ビンを通じて連絡している。貯水ビンは容量約 500 ml の細口ビンで、ビンの下部には内径 5 mm の高圧用ゴム管が接続固定できるようにゴム止め加工がなされ、ゴム管を通じて素焼ユニットと結合される。貯水ビンの水量は土壌水分の水湿状態の変化に十分対応できる容量をもち、絶えず素焼ユニットへ水を供給して土壌と測定装置との毛管連絡を保つことが必要であるが、筆者の実験測定によれば 500 ml 容であれば十分であることが認められた。

3) 圧力計 [Fig. 1 の 1, 2 および 5 の部分]

貯水ビンの水量変化にともなって発生した圧力を測定するためのもので、肉眼的な観測には、U型水銀圧力計（開管型）が三叉管を通じて連結されている。また、今後自記記録観測を行なうことを考慮して圧力電圧変換器の接続栓を三叉管の一端に設けた。

以上の各部分は Fig. 1 のように連結されて、野外設置用箱に固定収納されている。この装置のように、圧力が測定の対象となる場合に重要なことは、装置の各部分が高度の気密に保たれることである。わずかの気密もれがあっても圧力は発生されず、貯水ビン中の水の流失をまねいて測定不能となる。気密性の保持にはとくに注意しなければならない。

IV-2. 装置の作動

この装置の作動はつぎのとおりである。あらかじめ十分に飽水した素焼ユニットを、水で満した高圧ゴム管を通じて満水にした貯水ビンに連結させる。素焼ユニットを土壌中に埋設して、素焼固体と土壌とを密着させたのち装置の各部を密閉する。素焼固体内の水は土壌の毛管張力によって吸引され、土壌中へ移動する。素焼固体内の毛管孔げきと土壌毛管孔げきとは、両者の接触面にある空げき含めて、毛管水によ

って結合された状態となり、以後は土壌水の変化にともなう貯水ビンの水は移動し、貯水ビンの水の減量にともなう装置内に負圧を発生する。装置内の負圧と土壌水の pF 値が等価になるまで、貯水ビンから水は移動を続ける。

IV-3. 装置製作のための予備試験

前にも述べたように、この装置は土壌水の変化を間接的に測定するため、装置の気密保持と土壌水の変化に対応して、正確な圧力を発生することが大切な条件である。この条件を検定する目的で、以下に述べる3項目の実験をおこなった。

IV-3-1. 気密保持

各部分を密閉して、装置内を水銀柱 200 mm 減圧して1夜静置し、気密の保持状態を試験した。試作の過程で発生した気密もれの原因は、いずれも各部の接続不良によるものであった。これに対処するために、各接続部には高圧用グリースの塗布を行ない、高圧ゴム管は銅線等で締めつけをすることによって、完全に防止することができた。また、貯水ビンと注水栓、圧力計接続部はネジ止め金具で圧着されているが、接続面が広いのでゴムパッキングの使用のみでは不十分で、高圧用グリースの併用でこの装置の気密性を完全に保つことに成功した。

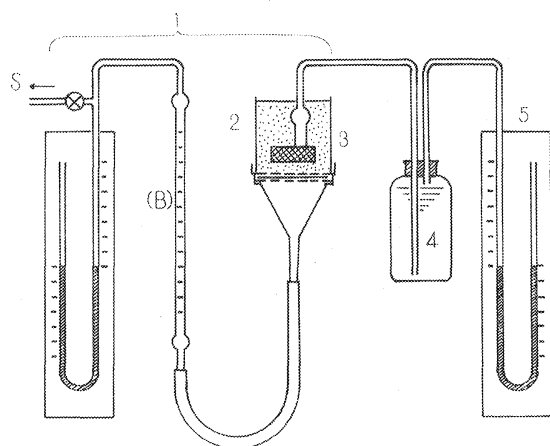
IV-3-2. 圧力(負圧)発生の確認

Fig. 3 に示した真下⁷⁾と同様の実験装置を用いて、素焼ユニットを埋設した細土の水湿状態に変化を与え、細土の脱水のために加えた圧力(減圧)と、供試装置内に誘起される負圧との関係を試験した。

素焼ユニットを埋設した細土を飽水したのち、各段階の規定圧で吸引して細土中の水を排除し、供試装置に誘起された負圧を測定した。誘起負圧と吸引圧力との関係は Fig. 4 に示したとおりである。

両者の圧力は各段階とほぼ一致したが、両者が平衡に達するまでに14~16時間を要し、この隔膜吸引装置で通常平衡に到達する時間に比べて長時間を要した。この原因は、素焼ユニットの埋設に使用した細土の量に関係しているものと考えられる。

この実験に使用した隔膜吸引装置は通常



1. 隔膜吸引装置 Membrane-suction apparatus,
2. 細土 Fine soil, 3. 素焼ユニット Ceramic
unit, 4. 貯水ビン Water stock bottle, 5. 水
銀圧力計(誘起圧用) Mercury manometer (for
generating pressure), B. ビューレット Burette,
S. 真空ポンプ Suction supplier.

Fig. 3 圧力発生試験装置

Apparatus of generating pressure experiment.

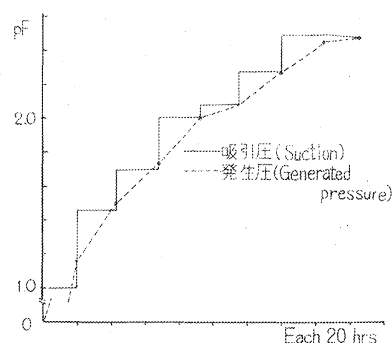
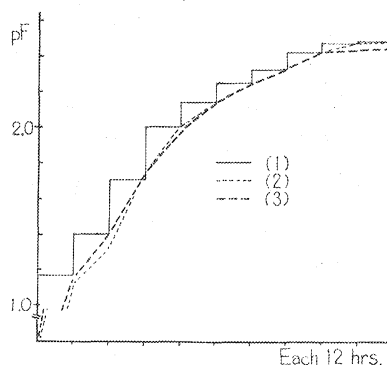


Fig. 4 隔膜吸引圧力と圧力発生との関係
Correlation of membrane-suction
and generating pressure in cera-
mic apparatus.

- (1) Membrane-suction
 (2) Generating pressure in large solid
 (2 × 3 × 6 cm).
 (3) " in small bulk
 (2 × 3 × 2 cm).

Fig. 5 素焼固体の表面積の相違と圧力発生との関係
 Correlation of membrane-suction and
 generating pressure by the bulk of
 ceramic solid.



400 cc 採土円筒を使用して、各吸引圧とも約8時間で平衡状態にする能力をもっている。この実験では約800 cc の細土を使用しているの、細土中の脱水がくれ、圧力が平衡に達するまでに長時間を要したのは当然の結果と考えられる。

IV-3-3. 素焼固体の表面積と誘起圧力との関係

土壤中に素焼ユニットを埋設する際に、土壤の自然状態が攪乱されることは避けられないが、これを最小限にとどめる配慮が必要である。土壤断面中に埋設される素焼固体の大きさは、過大なものでは攪乱面が広がるばかりでなく、その取り扱いも不便である。しかしながら、土壤と素焼固体の間ではその接触面だけで水の移動が行なわれるから、接触面の状態によっては、土壤水の変化に素焼固体の反応が対応できない場合も予想される。素焼固体の接触面（表面積）の大きさの相違と誘起圧力の状態について実験し Fig. 5 の結果を得た。実験に用いた素焼固体の大きさは大 (L) : 約 72 cm² (2 × 3 × 6 cm), 小 (S) : 約 32 cm² (2 × 3 × 2 cm) の表面積をもつ2種類で、隔膜吸引装置および円筒細土の量は IV-3-2 と同一のものを使用した。

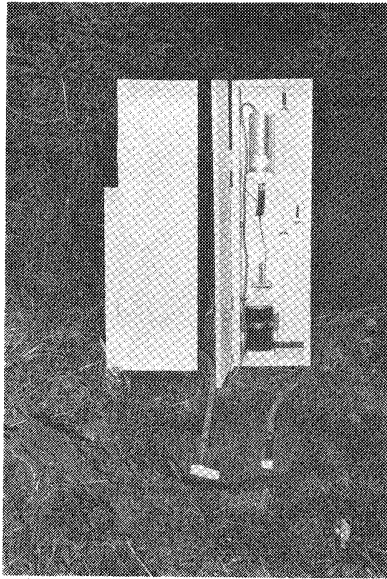
大小両固体とも比較的低い吸引圧の状態では、誘起圧力の差違は少なく、吸引圧に対応して敏感に反応した。しかし、pF 2.4 を境としてそれ以上の吸引圧下では、小形固体に誘起される圧力が大形固体のそれに比べてやや低く、隔膜吸引圧に達し得なかった。この原因は吸引脱水によって細土に収縮が起こり⁸⁾、収縮を生じない素焼固体と細土の接触が部分的に不良となり、水の移動が停止、または極度の能率低下を起こしたことに原因するものと判断された。とくに接触面が小さい場合には、接触状態のわずかな変化でも圧力の誘起に影響すると考えられるので、可能な範囲で素焼固体の表面積を大きくして、土壤と素焼固体の接触面積を大きくする必要がある。以上の実験結果から、固体の表面積は 72 cm² (2 × 3 × 6 cm) くらいあれば機能的にも十分で、また埋設等の操作に支障がなく、もっとも適当と思われた。

V 野外における測定

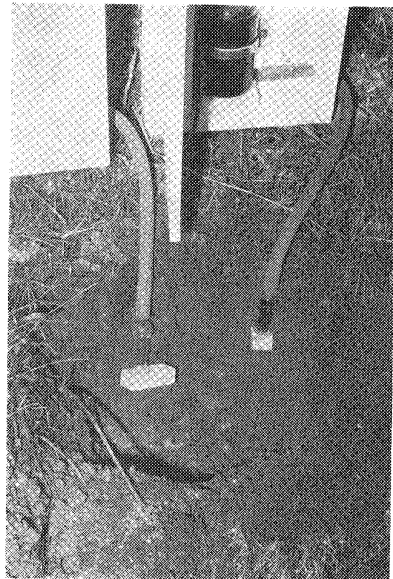
V-1. 測定装置の設置方法

筆者は新たに考案した上述の測定装置を製作して、野外における適応性の試験を兼ねて、長期にわたる森林土壤の水湿状態を測定した。観測地点における測定装置の設置は、次の要領にしたがって行なった (Phot. 3. 4 参照)。

土壤の自然状態をなるべく攪乱しないため、土壤断面の設定は必要最小限のものとし、断面形態その他の必要事項を記録後、素焼ユニットの埋設位置を決める。素焼ユニットは水で十分に飽和し、500 cc の貯



Phot. 3 測定装置の設置と素焼ユニットの埋設状況 (1)
Setting of the apparatus and ceramic unit in the field (1).



Phot. 4 同上 (2)
Ibid (2).

水ビンに水に満たす。ドライバーなどを使用して、素焼固体よりやや大きい埋設孔を断面と直角方向に設ける。素焼固体を挿入して埋設孔の上側に強く圧着し、そのままの状態では周囲の空げきになるべく石礫を含まない細土を十分につめて、素焼ユニットを固定する。ユニットの埋設は土壌断面の下部から順次行ない、土壌断面を埋め戻しながら作業をすすめる。埋設を終わった地点の地表面は、傾斜面の状況に注意して自然状態の現況にもどし、落葉枝なども周囲の現況に近づけるくふうをする。この装置は設置後約10分間以内に土壌水と反応して圧力を発生するのが普通である。圧力計が作動しない場合は気密の保持が不完全になっていることが多いので、設置時に操作した注水栓やその他の接続箇所を点検^{*1}して、装置の作動状態を確認しておくことが大切である。

V-2. 観測地点の概況

野外観測はつぎの2地域、4地点で実施した。素焼ユニットを埋設した深さは各地点ともに、それぞれ地表面から15 cm および 30 cm^{*2}の2点とした。

観測地1 京都市左京区鞍馬、京都営林署鞍馬山国有林内。

*1 気密もれの点検法：注水栓最上部まで水で満し十分に密栓する。貯水ビンと圧力計等の接続用金具のネジを固くしめる。三又管部のネジ蓋を外して高圧ゴム管を接続して吸引減圧する。圧力計の指示の変化を確認して貯水ビン中の気泡の発生状態を観察して気密もれの部分を探す。貯水ビンに気泡が発生しないときは三又管から圧力計接続部までの気密もれである。

*2 土壌中の水分を測定する位置は研究目的や立地条件等の相違にしたがって決めるべきものである。土壌水を自然土壌の環境要素の一つとして扱う場合には土壌断面の層位にしたがい、その土壌の特徴が明瞭に現われている位置がよいと考える。この試験では野外における土壌水の変化に対する装置の対応性の確認が主目的であったため、降雨などの気象変化を考慮して測定位置は地表面から一定の深さに統一した。

観測点(1): 海拔高 380 m, 傾斜 25°, 方向 S 60° W, 幅広い尾根の肩部, B₀(d) 型土壌 (残積土), 砂質壤土, 古生界砂岩, ヒノキ人工林 (60年生)。

観測点(2): 海拔高 300 m, 傾斜 30°, 方向 SW, 山腹下部急斜面, B₂ 型土壌 (崩積土), 砂質壤土, 細小石礫に富む, 古生界砂岩, スギ人工林 (60年生)。

観測地 2 和歌山県古座川町高池, 和歌山県林業試験場実験林, 海岸線から約 2.5 km 内陸, 沖積平坦面に接する低標高の山地。

観測点(3): 海拔高 80 m, 傾斜 38°, 方向 S 45° E, 山腹上部急斜面, B₃ 型土壌 (残積土), 第三紀層砂岩, 砂土～砂質壤土, シイ, ウバメガシを主とする常緑広葉樹林 (低木階にミツバツツジ密生)。

観測点(4): 海拔高 30 m, 傾斜 36°, 方向 S 45° E 山腹下部急斜面, B₀ 型土壌 (崩積土), 第三紀層砂岩, 砂質壤土, 小中石礫に富む, スギ植栽地 (8年生)。

水分測定地の降雨量の観測値は Table 1 および 2 に示したとおりである。これらの観測は次の各機関によって行なわれたものである。

1. 京都地方気象台鞍馬ロボット観測所 [水分測定点の東方約 2 km の地点で, 無人観測器のため寒冷期 (11月～3月) は凍結するため観測は中止されている。]
2. 和歌山県林業試験場 (同構内で観測され和歌山県気象台の指定観測, 水分観測点とは隣接している)。

V-3. 観測結果および考察

V-3-1. 測定装置の状況

観測期間中測定装置は比較的順調に作動し, 1～2回気密性が低下した障害が起こった以外は, 24か月経過した現在まで完全に作動していた。気密もれは装置の設置当初に起こっていることから, 設置時の点検を十分に行なう必要を痛感した。素焼ユニットについては, 約18か月間使用後土壌中から取り出して点検したが接着部やその他の機能に異状は認められず, 長期の使用に耐えることが確認された。また, 観測期間中の乾燥期には, 貯水ビン中の水が土壌中へ浸出して 1/2 容くらいまで減量することがあったが, 降雨後には比較的短時間で設置時と等量程度まで土壌水を吸入していたので, 貯水ビンへの水の補給は必要としなかった。

したがって, もし降雨後も貯水ビン中の水位を回復できない状態が生じたとすれば, それは装置の気密性が低下した場合と, 乾燥が強く pF 3.0 を越えるような水湿状態におかれたために, 素焼固体内の毛管水が切断された場合のいずれかであると判断される。

V-3-2. 観測結果

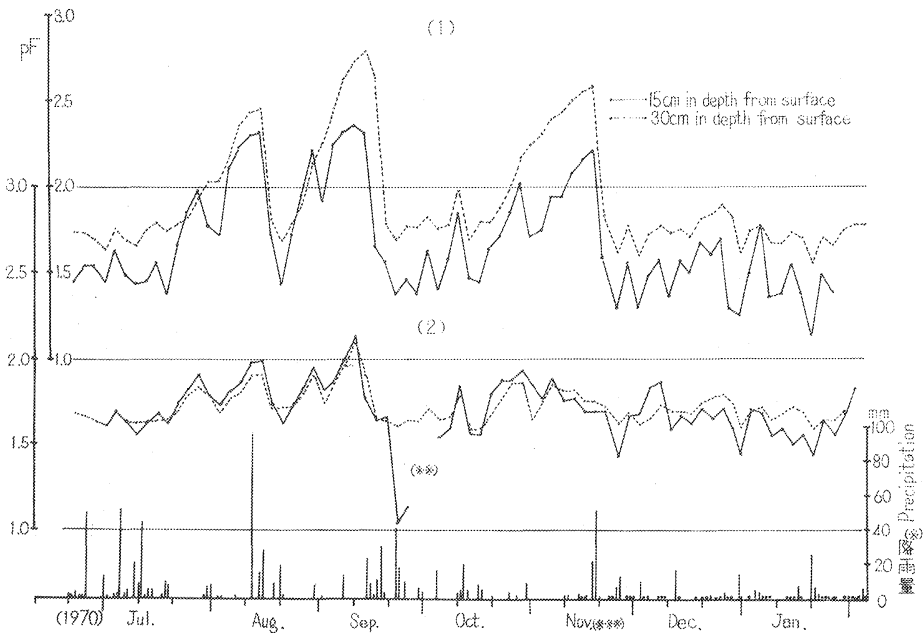
観測は3日目ごとに行なうことにしたが, 観測者の都合によって多少の変更を余儀なくされた場合もあった。

各観測点における土壌水の pF 値の変化と降雨との関係は Fig. 6, 7 に示すとおりであった。これらの観測結果から, 立地条件 (土壌型) の相違や, 気象条件 (降雨) の変化と土壌水の状態は密接な関係をもっていることを確認することができた。

V-3-3. 土壌の水湿状態 (pF 値) の季節的な変化および地域的な特徴

いずれの観測点においても, 土壌水の pF 値の変動は降雨と密接な関係を示し, 晴天期間*に上昇した

* 便宜的に降雨のなかった期間を晴天期間とみなした。



- (1) (観測地) 京都市左京区鞍馬京都管林署鞍馬山国有林 (土壌型) Bb(d) 型
Bb(d) soil is slightly dried brown forest soil, National forest in northern part of Kyoto city (Plot. 1).
- (2) (観測地) 京都市左京区鞍馬京都管林署鞍馬山国有林 (土壌型) Be 型
Be soil is slightly wetted brown forest soil, National forest in northern part of Kyoto city (Plot. 2).
- (*) 降雨量の観測値は京都地方気象台の鞍馬観測所の資料である。
- (**) 欠測
- (***) ロボット観測のため、11月12日観測中止、降雨量は、京都地方気象台の資料である (降雨量中・印は降雪量 0 mm を示す)。

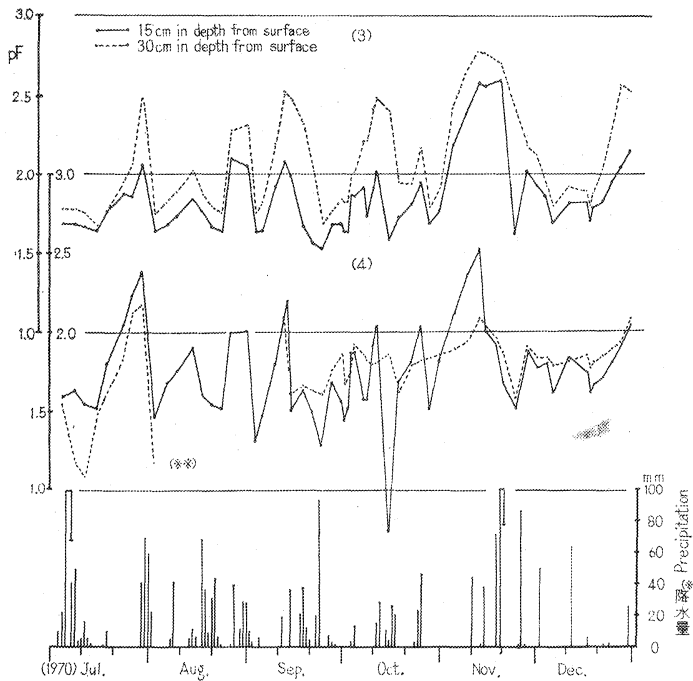
Fig. 6 pF 値の変動と降雨の関係
Correlation between variance pF value and rainfall.

pF 値は降雨後には急激な低下を示した。pF 値の変化量や変化形式と、降雨量およびその頻度との数量的な関係は現在未解析の段階であるが、降雨の頻度と pF 値が低下する現象とは相関が高く、降雨頻度の増大につれて pF 値は全体に低い値を示していた。

このように、土壌水の変化は降雨に強く影響されるので、各水分観測地域の気象条件(降雨)の相違を反映して、次のような特徴のある季節的な変化がみられた。

京都市鞍馬地区(京都市北部山地)は、福井⁴⁾によれば東山盆地気候区の笠置地区に含まれている。鞍馬地区は山地のためか、最高および最低降水量の出現時期と降水頻度が盆地気候区⁴⁾とやや異なり、とくに冬期は日本海側の気候⁴⁾に近い様相がうかがわれる。降水量はとくに多くはないが降雨や降雪の頻度が高く、晴天日数は盆地南部に比べて減少している。このような気象条件を反映して、Fig. 6 に示すように Bb(d) および Be 型土壌ではいずれも冬期には pF 1.2~1.9 を示し、夏~秋季までの pF 値 1.5~2.8 と比較して低い値を示していた。また、降雨頻度の高かった梅雨期や秋雨期には冬季と同様に低い pF 値を示していた。

紀伊半島南部海岸地域は温暖多雨の気候下にあるが、福井⁴⁾の太平洋岸型気候区にはいる。降水量および降水頻度は Table 2 に示したように、晩秋~春季(11月~3月)には少なく、初夏~秋季(5月~10



(3) (観測地) 和歌山県古座川町
(土壌型) Bb 型
Bb soil is dried brown forest soil (southern part of Wakayama Prefecture) (Plot. 3).

(4) (観測地) 和歌山県古座川町
(土壌型) Bd 型
Bd soil is moderately moist brown forest soil (southern part of Wakayama Prefecture) (Plot. 4).

* 降雨量の観測値は和歌山県気象月報のものであり、観測機関は和歌山県林業試験場である。

** (4) 30cm, 装置不良のため欠測。

Fig. 7-1 pF 値の変動と降雨の関係 (1970年6月~12月)
Correlation between variance pF value and rainfall (Jul.~Dec. 1970).

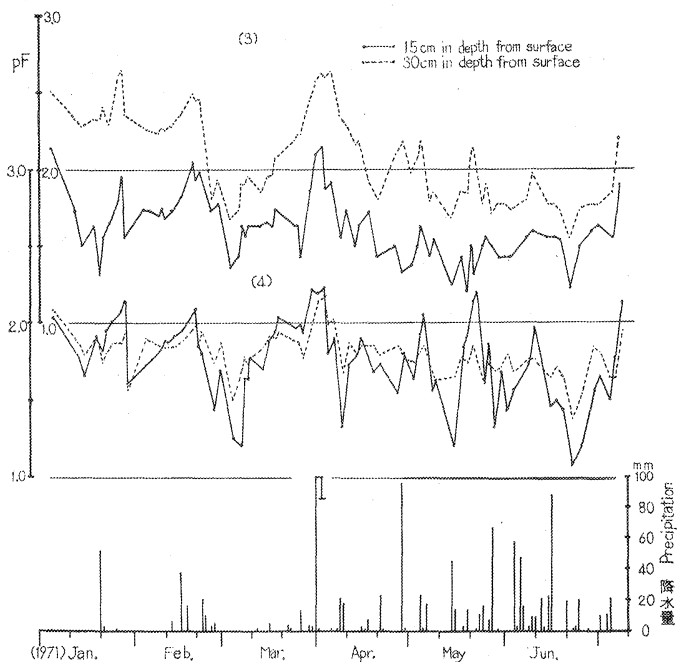


Fig. 7-2 pF 値の変動と降雨の関係
(1971年1月~6月)
Correlation between variance pF value and rainfall (Jan.~Jun. 1971).

Table 1. 降水日数と降水量(京都市鞍馬)
Number of rainy day and precipitation (Northern part of Kyoto City)

月 Month	降 水 日 数 Number of rainy day	降水日数(<1.0mm) Number of rainy day	降 水 量 (mm) Precipitation
6月 Jun.	(17) *	—	391
7月 Jul.	(18)	—	188
8月 Aug.	(10)	—	181
9月 Sep.	(13)	—	164
10月 Oct.	(10)	—	76
11月 Nov.	16	8	102
12月 Dec.	19	12	48
1月 Jan.	20	13	57
2月 Feb.	26	16	57

1970~1971年(京都府気象月報)

6月~10月 鞍馬山観測所(無線ロボット), 11月~2月 京都気象台。

(*) は無線ロボット観測のため 1.0 mm 以下の降水は観測されていない。

Table 2. 降水日数と降雨量(和歌山県古座川町)
Number of rainy day and precipitation (Southern part of Wakayama Prefecture)

月 Month	降 水 日 数 Number of rainy day	降水日数(<1.0mm) Number of rainy day	降 水 量 (mm) Precipitation
6月 Jun.	21	1	606
7月 Jul.	15	0	475
8月 Aug.	18	1	399
9月 Sep.	14	0	276
10月 Oct.	11	0	192
11月 Nov.	8	2	365
12月 Dec.	6	1	148
1月 Jan.	5	0	63
2月 Feb.	7	0	99
3月 Mar.	8	1	148
4月 Apr.	12	4	176
5月 May.	14	0	219
6月 Jun.	17	1	326

1970~1971年(和歌山県気象月報), 和歌山県林業試験場構内で観測。

月)にはすこぶる多い特徴がある。したがって, Fig. 7-1, 2 に示すように, 古座川町(紀伊半島南部海岸)における Ba 型および Bb 型土壌の pF 値は, 降水量および降水頻度を鋭敏に反映して, それぞれ特徴のある変化を示した。降雨期間*における pF 値は, Ba 型土壌では 1.2~1.8, Bb 型土壌では 1.0~1.7 の範囲であった。その他の期間では, 前者の pF 値は 1.8~2.7 であり, 後者においては 1.7~2.3 の範囲で明りょうな差が認められた。高い pF 値の持続された期間は降雨頻度の低い冬季であったが, 南部海岸地域は降水量が多いため, pF 値の変動は季節に関係なく降雨による影響が強く現われていた。

このように, pF 値の変動は降雨に大きく影響され, 気候区(地域性)や季節によって特徴的な変動を示していた。また, 井上³⁾が指摘した変動範囲, pF 1.0~2.7 とほぼ一致していた。

* 便宜的に降水量および降水頻度の高い期間を降雨期間とみなした。

V-3-4. 土壌型の相違と pF 値の変動の特徴

pF 値の変動の状態は、土壌型の相違によってそれぞれ特徴のある形態を示した。V-3-3 でも述べたとおり、乾性の要素をもっている B_u 型および B_u(d) 型土壌は、一般に湿潤性の B_n 型や B_e 型土壌に比べて高い pF 値を持続する。両者とも降雨に対する反応は敏感で、降雨時には pF 1.5 付近まで急速に低下するが、脱水過程は前者が早いため、前者の変動幅は大きく急激で、変動型といえることができる。さらに、両者のもっとも大きな相違点は、素焼ユニットの埋設の深さのちがいによって、pF 値の変動形態がまったく異なっていたことである。すなわち、湿潤型の土壌では土壌断面の上部 (15 cm) が、下部 (30 cm) に比べて高い pF 値を持続し、表層土ほど乾いた水湿状態を示していた。また、降雨による影響は表層に近いほど強く受けるため、上部および下部の pF 値曲線は交差を反復しながら、しだいに上部の pF 値が高い値を示している。これに対して乾性型の土壌では、下部の pF 値が常に高い状態に保たれ、降雨時には上部、下部の pF 値とも低下してかなり近接した値を示すが、pF 値曲線が交差することは非常に少なかった。この点は測定資料が少ないので、これが乾性型土壌の一般的な特徴であるか、またはこれらの観測地点だけに限られた特徴であるかは判断はできないが、乾性土壌には顕著な履歴効果がある¹⁰⁾ことから判断して、野外土壌の履歴効果とも考えられる。今後乾性型土壌の水分環境を解明する手がかりとして興味ある現象である。

これらの野外観測期間を通じて測定された pF 値の最高値は約 2.8 であり、真下⁸⁾の指摘しているとくに強い乾性土壌を除いた、野外の土壌水の pF 値の限界と近似的な値であった。

以上がこの試験で得られた主な結果である。観測地点や資料も少ないうえ、土壌水の変動に関与すると考えられている環境の諸要素や、土壌自体の性質との関係も未解析の現段階では、細部にわたる検討はむずかしい。これらの問題については、今後の調査研究の進展によって明らかにする予定である。したがって、この報告では考案した装置によって、長期にわたる野外での土壌水の測定結果だけを示すにとどめた。

VI 今後に残された問題点

この試験の期間を通じて得られた問題点はつぎのとおりであるが、これらについては今後ひきつづき研究を進める予定である。

VI-1. 土壌の水環境について

土壌水のうちで pF 1.7 以下の水は非毛管重力水であって土壌中に保持される期間は短いものとされている⁵⁾⁶⁾。したがって、その性質や作用についてはあまり重要視されない傾向にあった。しかし、この試験の結果ではかなり長い期間にわたって、pF 1.7 以下の状態が持続されることが明らかになった。pF 1.7 以下の非毛管重力水であっても、これが毛管水に作用して土壌の水湿状態を湿潤に導き、また、一時的な停滞水として過湿状態になることも考えられる。植物の生育との関連においても、土壌生成過程からもこの状態の土壌水に注目する必要があると考える。

VI-2. 測定装置について

この試験ではほぼ 3 日に 1 度の人為による肉眼的な観測であったため、降雨などによる環境変化と土壌水の変動の状況を経時的に、また、連続的に把握することが主目的であったにもかかわらず、これらの点を十分解明することはできなかった。人為的な観測では労力的にも観測頻度に限界があり、とくに観測点を山地にもとめる場合には、今後ますますこの状態での観測は困難になることが予想される。したがっ

て、早急に自記記録法による観測体制を確立する必要がある。この点については、目下ほとんど開発を終わり野外試験を継続中である。

また、この試験に使用した装置は、構造上冬季に凍結による貯水ビンの破損が発生した。寒冷地でとくにこの危険性が大であり、装置内温度が (-2°C) 以下での使用は困難であった。土壌水が凍結する場合以外の低温下での使用を可能にする必要があった。この点に関しては装置の改良を終わり、凍結防止の見とおしが得られた。

文 献

- 1) 有光一登・松井光瑤：簡易な テンションライシメーター による土壌水分の動的な研究 (1), 日林誌, 46, 209~213, (1954)
- 2) Bouyoucos, G. J. and A. H. Mick: An Electrical Resistance Method for the continuous measurement of moisture under field condition. Michigan State College Tech. Bull., 172, (1940)〔5〕から引用
- 3) 井上輝一郎・岩川雄幸：林地における土壌水分の動態 (1), 日林誌, 52, 238~243, (1970)
- 4) 福井英一郎：日本の気候, 興林会, 61~74, (1939)
- 5) KOHNKE, H.: Soil physics. McGraw-Hill Inc. New York, 49~60, (1968)
- 6) KRAMER, P. J.: Plant and soil water relationships, McGraw-Hill, Inc. New York, 56~61, (1969)
- 7) 真下育久：森林土壌の水湿状態 (pF 値), 林野土調報, 8, 43~66, (1957)
- 8) ————：森林土壌の理学的性質とスギ, ヒノキの成長に関する研究, 同上, 11, 1~145, (1960)
- 9) 大政正隆：ブナ林土壌の研究, 林野土調報, 1, (1951)
- 10) 大政正隆・真下育久：森林土壌の吸水性に関する研究, 同上, 8, 25~42, (1957)
- 11) SCHOFIELD, R. K.: Trans. 3rd. Internatl. Cong. Soil Sci. 2, 37, (1935)〔真下育久：日林誌, 34, 141~144, (1952) から引用〕
- 12) 寺田喜助・丸山節夫：実用的立場から見た簡易土壌水分の測定法と2・3の観察例, 第62回日林講, 136~139, (1953)
- 13) 山谷孝一：ヒバ林土壌水分の季節的变化, 日林誌, 33, 97~101, (1951)

Studies on Moisture Status of Forest Soils Part 1 A proposition of a ceramic block apparatus for long-term soil moisture measurement in the field and some results

Jirō YOSHIOKA*

Summary

It is known that one of the most important factor of soil formation and plant growth is soil water which fills a part of the pores in the soil. Water has an affect upon several physical and chemical soil characteristics; therefore, we have to make clear the actual soil

Received March 4, 1972

* Laboratory of Soil Science, Kansai Branch Stat. of this Experiment Station.

water status in the field over a long period. The author devised a ceramic solid apparatus for soil water measurement which was designed for measurement of pF value of less than about 2.9. Ceramic solid was used as a sensor as its water permeability is effectual and its moisture condition easily changes depending on the surrounding soil moisture content.

The following experiments were done to make this apparatus:

1. The preliminary experiments in laboratory
 - 1) Airtight ability
 - 2) Negative pressure (tension) generation in apparatus
 - 3) Effect of ceramic solid bulk
2. Tests for practical use of apparatus in the field

This paper deals with the mechanism of this apparatus and the results of the aforementioned experiments.

I. Mechanism of the apparatus

The apparatus consists of the following three main parts as shown in Fig. 1 and Phot. 1.

(1) Ceramic unit: It is a combination of ceramic solid and glass tube. They are pasted with metal glue as shown in Fig. 2 and Phot. 2. The ceramic unit is connected with a water stock bottle through the high vacuum rubber tubing.

(2) Water stock bottle: It is about 500 ml in capacity and is connected with the ceramic unit through the connecting pipe near its bottom. The plug for water level control of the stock bottle, manometer conjunctional fine metal pipe and plug for pressure-voltage transducer, are set at the neck of the bottle. The plug for transducer is not necessary for the manometric measurement, but it is for the future automatic recording.

(3) U glass tube mercury manometer: It is for macroscopic pressure measurement.

II. Preliminary experiments in laboratory

II-1. Airtight ability test

It is necessary to keep the apparatus completely airtight. The apparatus was kept at 270 cm of hydraulic head suction for about 12 hours. The airtightness of apparatus was often lost at conjunctional parts, but it could be secured completely by coating with high vacuum grease or tightening up the rubber tubing at conjunctional parts with wire.

II-2. Negative pressure (tension) generation test of the ceramic solid apparatus

The following test was done to make clear the correlation between soil moisture status and generation of negative pressure in ceramic solid apparatus. The ceramic unit of apparatus which was filled with water was placed in water saturated fine soil on the membrane-suction apparatus as shown in Fig. 3, and it was kept under various tension stages. The water in the ceramic unit was drawn out into the burette (B) (See Fig. 3) by the given suction, and water loss in the ceramic unit was supplied continuously with water in water stock bottle (4) (See Fig. 3) until suction in supplier and negative pressure in the ceramic solid apparatus reached the tension equilibrium. The suction maximum given in membrane-suction apparatus was pF 2.5. In this range of given suction, the suction was proportional to generating tension in ceramic solid apparatus. Correlations between the suction and the generating tension were shown in Fig. 4.

II-3. Effect of ceramic solid bulk

The author tested the effect of the difference of ceramic solid bulk on the correlation between the given and generating suction using the apparatus shown in Fig. 3. The large

ceramic solid bulk was about 72 cm³ (3×2×6 cm) and the small one was 32 cm³ (3×2×2 cm) in surface dimension. It is recognized that the bulk of ceramic solid often affected the exact response of the ceramic solid apparatus to the suction. When contact of the small ceramic solid with the soil was disturbed by the soil shrinkage induced by the water loss of soil (dehydration) with suction, the risen up tension did not equate with the given suction. However, the large ceramic solid has a good response to the given suction even after the soil shrank. This being so, it is concluded that the small ceramic solid is not suitable for practical use.

III. Test for practical use and some data of measurement in the field

III-1. The method of setting the apparatus

The ceramic solid was completely saturated with water and the water stock bottle, rubber tubing and glass tube were filled with water. The ceramic unit was set in the soil of 15 cm and 30 cm depth from surface in the same soil profile.

III-2. The site conditions of the measured plots

Plot 1. A 60-year-old planted Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) forest B₀(d) soil that is slightly dried brown forest soil by the classification system of the National Forest Soil Survey, northern part of Kyoto City.

Plot 2. A 60-year-old planted Sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) forest, B₂ soil that is slightly wetted brown forest soil, northern part of Kyoto City.

Plot 3. Natural broad leaf forest, B₂ soil that is dried brown forest soil, southern part of Wakayama Prefecture.

Plot 4. Planted young Sugi (*C. japonica*) forest, B₀ soil that is moderately moist soil, southern part of Wakayama Prefecture.

III-3. The result of measurement

The author was very satisfied with the results in that no trouble occurred during the tests for 24 months up to the present, and the sharp responses of the apparatus to the changes of soil water status.

Some data of field measurement were expressed in Fig. 6 and 7.

The most important environmental factor on the change of soil water status was the frequency of rainfall in all measured plots. The maximum water tension was pF 2.8, observed in the slightly dried soil (B₀(d) soil) among the measured plots. The undermentioned two patterns of change of soil water status were observed.

One of the patterns is the higher tension type which appeared in dried and slightly dried soils (B₂ and B₀(d)-soil).

Their soil water status kept a high tension of about pF 2.2~2.8 during the non-rainfall period but it suddenly dropped to the low tension of less than about pF 2.0 after the rainfall. So the soil water movement of this pattern responded rapidly to the changes of atmospheric phenomenon, and the range of water tension change was wider than the other pattern.

The other pattern was the lower tension type which appeared in the slightly wetted and moderately moist soils (B₂ and B₀-soil). Their soil water status kept low tension, less than about pF 2.0 during the non-rainfall period. It dropped to about pF 1.2 after the rainfall.

The unexpected result on the soil water status was observed on the dried and slightly dried soil (B₂ and B₀(d)-soil) (See plot 1 in Fig. 6 and plot 3 in Fig. 7). The pF value of lower horizon kept a higher water tension than that of the upper one in every soil throughout the measurement period. A similar trend was not observed on the slightly wetted and moder-

ately moist soils (B_E and B_D-soil) where the upper horizon kept the higher water tension than their lower horizons.

It was left for future studies to ascertain whether the aforementioned unexpected results on the dried or slightly dried soils would be a trend in general or that limited to the measured forests.

The author believes from the results obtained that this ceramic solid apparatus would be effectual for practical use in the long-term measurement of soil water movement in the field.