

渇水期における地下水の動態に関する研究
I. 傾斜地の土壤水分動態に関する研究

五十嵐正次・渋谷勤治郎
農林省農業土木試験場

Studies the Behavior of Groundwater in Droughty Season
I. Study on the Soil Moisture Behavior in Slope Land
During Drought

By

Shoji Igarashi and Kinjiro Shibuya

National Research Institute of Agricultural Engineering, Hiratsuka

Abstract

The state of soil moisture in the upper layer of slope land use for agriculture was measured with tensiometers in 1970 and 1971 in order to elucidate its behavior in droughty season.

The research sites are a grassland of Shikoku Agricultural Experiment Station and an orchard of Akitsu Branch, Horticultural Research Station. Both sites are located in the Inland-Sea climatic region which is notable for its low precipitation and frequent drought.

The grassland has a high groundwater table, and the orchard a medium one, and the moisture holding capacity of their soil is fairly good.

Results obtained are as follows:

- 1) The tensiometer readings made clear the pattern of change in soil moisture with season, depth and succession of droughty days.
- 2) By using this pattern, the pF values at several depths were estimated for extended drought.
- 3) The water balance of surface soil also gave an estimate of pF value according to the duration of drought.
- 4) The water balance study for orchard plot resulted in the evaluation of runoff components and losses.
- 5) The water supply from deeper soil by conductivity was estimated to be very small.
- 6) Whereas the properties and moisture content of top soil are observed to be rather uniform even in slope land, those of subsoil have a great local variability which may pose some problems in amelioration practice.

目

次

1. 緒言	18	1) 土壤水分	21
2. 試験地と試験項目	18	2) 土壤の物理的性質および降水量	21
1) 試験地	18	4. 測定結果および解析	23
2) 試験項目	19	1) 土壤水分張力の経時変化	23
3) 試験地の気候	19	2) 連続干日数と土壤水分張力	24
4) 試験地の地形・地質・土壤	20	3) 土壤水分張力のプロファイル	25
5) 試験地の植生・土地利用	20	4) 土壤水分張力の変化と土性および 局所地形	26
3. 試験方法	21		

5. 水収支…………… 27

6. 干ばつ時における土壌水分動向の予測… 27

1) pF値変化による統計的推定…………… 27

2) 土層の水収支によるpFの変化の推定…………… 28

7. 土壌水分の下方からの補給量の推定… 29

1) 下方からの補給量の観測…………… 29

2) pF - 含水率曲線からの透水係数の計算…………… 30

3) 下方からの水分補給量の推定…………… 30

8. 結 言…………… 30

参考文献…………… 31

1. 緒 言

昭和42年の西日本における異常干ばつの経験を集収・整理し、その結果、必要とされる調査・研究を補足して、異常干ばつに対する技術的対応策を検討するために本調査は行なわれた。元来、この種の問題は多方面にわたるものであるが、本稿は傾斜地の、渇水期における地下水の動態に関連して、傾斜地帯の農用地における浅層の土壌水分の動態を追求したものである。

前記の異常干ばつは、通常、かんがいの計画基準に採用されている10年に1回程度の連続干天によるものではなく、80数日にも及ぶもので、数十年に一度の再現期間を有するものと考えられる。この様な異常時には、通常、注意をひかない様な立地的差異が顕在化するものと考えられ、立地条件についての深い洞察を得る機会を与えるものと考えられる。

前記の異常干ばつ時の調査によれば¹⁾、干害の程度は作目・樹種・品種によることは勿論、地形、土壌、造園形態、対応策の仕方によっても、かなり異なっていることが明らかにされている。これらの事実は、異常干ばつに際しての技術的対応について、多くの示唆を与えるものと考えられる。従

来の研究によると、干害の程度に大きく寄与すると考えられる因子として、土壌の保水性と、乾燥時における下方からの水分の補給の難易がある。これらの因子の影響を明らかにする一助として、立地条件との関連を考慮しつつ、土壌水分の動態を追求することによって、異常干ばつ時における土壌の水分保留特性および水分伝達特性の機能を研究することとした。なお、解析は昭和45年および46年の資料によった。

本研究の遂行に当っては、園芸試験場安芸津支場果樹栽培生理研究室、四国農業試験場土地利用部土地基盤研究室の御協力を得た。特に安芸津支場では町田室長、長谷技官から水収支関係の資料を提供して頂いた。深謝する次第である。

2. 試験地と試験項目

1) 試験地

試験地としては、我国の寡雨地帯に属し、干ばつの頻度も比較的高い、瀬戸内地方に位置する四国農業試験場土地利用部のホ場（香川県善通寺市生野）を選定した。また、近傍の類似比較地として、園芸試験場安芸津支場のホ場（広島県豊田郡安芸津）を用いた。

四国農試のホ場は大麻山（標高616m）の北麓下部に位置し、1961年に開こんされた斜面畑の

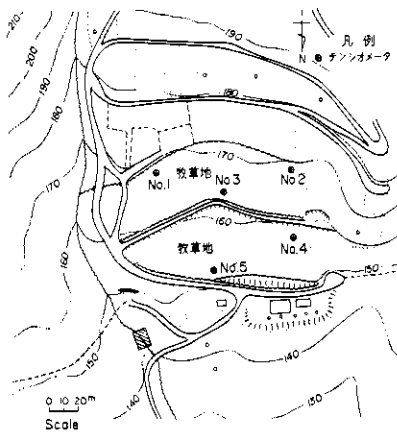


図1 試験地の概要（四国農試）

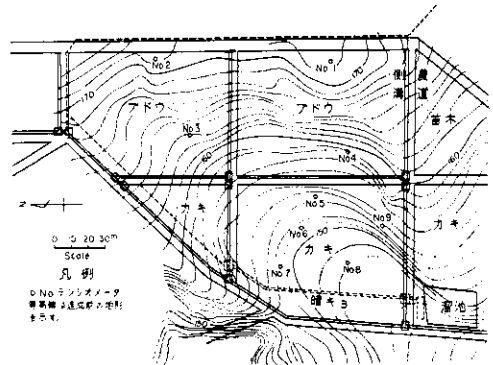


図2 試験地の概要（安芸津）

草地である。安芸津ホ場は1968年に開かんされたカキ、ブドウの傾斜畑樹園地であり、標高200m程の丘陵地の南斜面の上位部にある。なお、試験地の地形図を図-1、図-2に示す。

2) 試験項目

この調査の目的は土壌水分の保留量、増減量、移動量と、土壌自体の特性および環境因子との関連の解析とその結果を用いての、干ばつ時における土壌水分状態の予測である。この調査は前記の目的から、当然、長期連続観測が必要とされるので、テンシオメータを用いて、土壌水分張力を測定し、土壌水分量は土壌水分張力と排水過程の含

水率との関係から算出した。土壌水分量は降雨・日照、気温などの気象条件の外、土壌自体の物理性・地形・土地利用方法、植生状態などによっても著しい影響を受けるから、これらの項目についても必要な測定を行なった。なお、安芸津ホ場においては巨視的な土壌水分動態を解析するために水収支調査を行ない、地表流出量および地下流出量の測定を行なった。

3) 試験地の気候

四国農試および安芸津支場における調査年の月別平均気温、降水量を表-1、表-2に示す。

表-1 四国農試の気候 (単位℃, mm)

項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均又は合計
月平均気温(S45)	4.6	6.6	6.3	13.1	18.8	21.1	27.0	28.3	25.5	18.5	12.2	7.4	15.8
" (S46)	5.1	5.9	7.9	14.2	18.6	23.0	27.6	27.2	23.4	16.8	13.2	8.3	15.9
月降水量(S45)	—	—	—	—	—	290.0	126.0	151.0	155.5	—	—	—	—
" (S46)	—	—	—	75.5	99.5	255.5	157.5	160.5	103.0	109.5	23.5	—	—

注) 月平均気温は四国農試栽培部(普通寺, 仙遊町, 標高30m)の値を示す。

表-2 安芸津支場の気候 (単位℃, mm)

項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均又は合計
月平均気温(S45)	3.7	5.7	5.0	12.3	17.7	19.7	25.0	26.8	24.3	18.1	11.8	6.6	14.7
" (S46)	4.3	4.3	6.9	13.5	17.1	21.5	25.7	26.1	22.6	16.8	12.7	7.5	14.9
月降水量(S45)	23.0	48.5	35.0	221.0	153.0	430.0	156.5	166.7	154.4	132.0	55.5	35.5	1611.1
" (S46)	20.5	31.8	66.5	75.5	143.5	187.0	226.3	92.1	209.0	74.5	2.5	37.0	1166.2

気候から推定される蒸発散能についてはソーンスエート式(1)、およびハモンの式(2)を用いて計算した値を表-3、表-4に示す。なおハモン式に

よる計算は月平均気温を用いて日当りの蒸発散能を求め、その月の日数倍した概略値である。

表-3 四国農試土地利用部ホ場の蒸発散能 (単位mm)

項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
昭45(ソーンスエート)	5.2	10.0	11.1	42.5	86.8	105.4	162.2	165.8	124.8	68.7	30.0	12.3	824.8
"(ハモン)	19.5	23.1	30.1	53.5	89.6	105.3	147.9	142.7	100.7	58.1	32.2	22.1	824.8
昭46(ソーンスエート)	6.4	8.1	13.1	48.8	85.2	121.8	168.2	155.3	108.0	58.4	34.4	15.1	822.8
"(ハモン)	20.1	22.2	31.2	57.3	88.5	118.1	153.0	134.1	89.6	52.2	34.3	23.5	824.1

注) 表-1の月平均気温から標高差130mに相当する気温降下量 $1.3 \times 0.55 \approx 0.7$ ℃を差引いた値に対する蒸発散能を示す。

表-4 安芸津支場ホ場の蒸発散能(単位mm)

項 目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
昭45(ソーンズエート)	5.1	9.9	9.8	43.1	84.8	100.7	149.9	158.0	120.6	71.5	32.1	12.6	798.1
"(ハ モ ン)	19.3	22.8	29.1	53.2	87.5	101.3	137.5	136.3	98.0	59.1	32.8	22.0	798.9
昭46(ソーンズエート)	6.5	6.4	14.1	49.9	80.3	115.6	155.9	152.2	108.3	63.5	36.1	15.4	804.2
"(ハ モ ン)	20.0	21.0	32.7	57.3	84.3	112.5	143.0	131.0	89.1	54.6	34.7	23.3	803.5

ソーンズエートの式

$$j_n = \left(\frac{t_n}{5}\right)^{1.514}, \quad J = \sum_{n=1}^{12} j_n$$

$$PE_x = 1.6 \cdot \left(\frac{10t}{J}\right)^a \quad (1)$$

$$a = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot J^3 - 7.71 \cdot J^2 + 0.01792 \cdot J + 0.49239$$

$$PE = PE_x \cdot \frac{D \cdot T}{360}$$

但し, t_n : 連続する12カ月の月平均気温(°C)

j : 月の熱示数

J : 年の熱示数

PE_x : 平均気温 t °Cの月の蒸発散能
[cm/30日],

PE : 平均気温 t °C, D 日/月,
 T 時間日照/日の蒸発散能
[cm/月],

D : 当該月中の日数(日),

T : 当該月中の日の出から日没までの平均
時間数[時間]

ハモンの式

$$PE = 0.14 \cdot D^2 \cdot P_t \dots\dots\dots(2)$$

但し, PE : 平均蒸発散能[mm/日]

D : 1日の日照可能時間で12時間を単位

とする

P_t : 日平均気温における飽和絶対湿度
[g/m³]

4) 試験地の地形・地質・土壌

四国農試ホ場は大麻山の山麓に位置し, 北北西向き斜面で, 標高は150~170m, 勾配は9~12°である。テンシオメータ設置地点においては概して安山岩質の土壌が優位を占め, 土壌の仮比重は1.0~1.7, 土性はCLが多いが, 一部, LiC, SLの所もある。全般に石礫に富む土壌である。

安芸津ホ場は丘陵の頂部に近い位置を占め, 南向き斜面で, 標高は150m~170m, 勾配7~8°である。土壌は流紋岩に由来するもので, 土性はCLが主体で, 比較的粘質であるが, 石礫を含む。土壌の仮比重は1.3~1.6である。

両試験地の土壌の水分保留特性は図-3, 図-4に示す。ただし, pF1, pF1.5は土柱法, pF2, pF2.5は吸引法, pF3, pF4は遠心法により測定した。

図示してある値は四国農試ホ場にあつては5地点の平均値, 安芸津ホ場にあつては9地点の平均値を示す。

5) 試験地の植生・土地利用

四国農試ホ場は永年収草地で草種はトールフェ

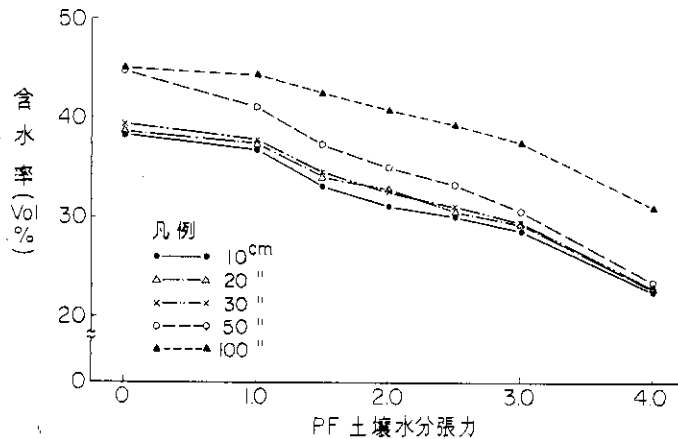


図3 pF・含水率曲線(四国農試)

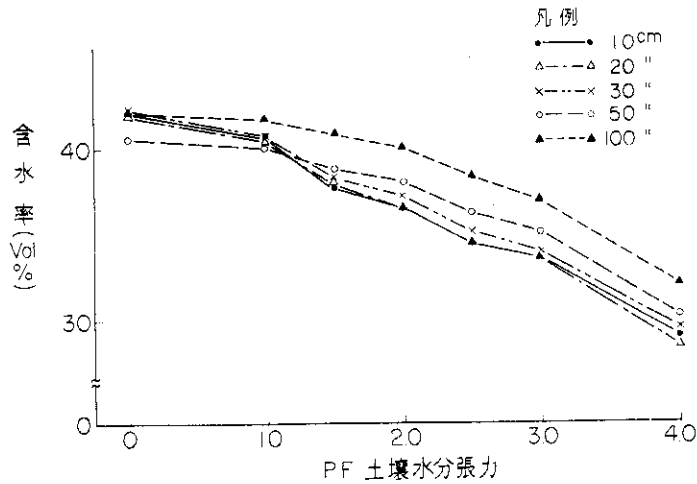


図4 pF・含水率曲線(安芸津)

スクである。収量は目測によると中位ないしやや劣位であり、刈取りはモアを用いた。試験期間中は刈取り管理のみ行なわれた。

安芸津ホ場は造成後、カキとブドウが植付けされた。カキは5.5m×2.75m間隔に植付けられたが、調査期間中は樹高2mであった。カキ、ブドウ共に地上を覆うには到っていないため、雑草のエノコログサ・メヒシバ等が繁茂し、刈取りによる管理がなされた。

3. 試験方法

1) 土壌水分

テンシオメータの設定位置は図-1、図-2に示してあるが、埋設深さは各地点とも地表から、深さ10、20、30、50、100cmである。使用したテン

シオメータはIKDS-7型またはDIK-1型である。土壌水分張力の読み取りは原則として毎日9時~10時に一回行なった。

2) 土壌の物理的性質および降水量

土壌水分保持特性については、テンシオメータ設置点から、100mlのサンプラーを用いて土壌試料を採取し、実験室内で、土柱法、吸引法および遠心法によって、pF、水分関係を求めた。ホ場における水分変化の研究対象は排水過程が主であるから、前記のpF、水分関係は排水過程における値を採用した。

降水量は標準雨量計により測定され、蒸発計蒸発量はφ20cmの蒸発計で測定された。

安芸津における地表流出および地下流出量の測定はJIS規格の直角三角比によって行われた。

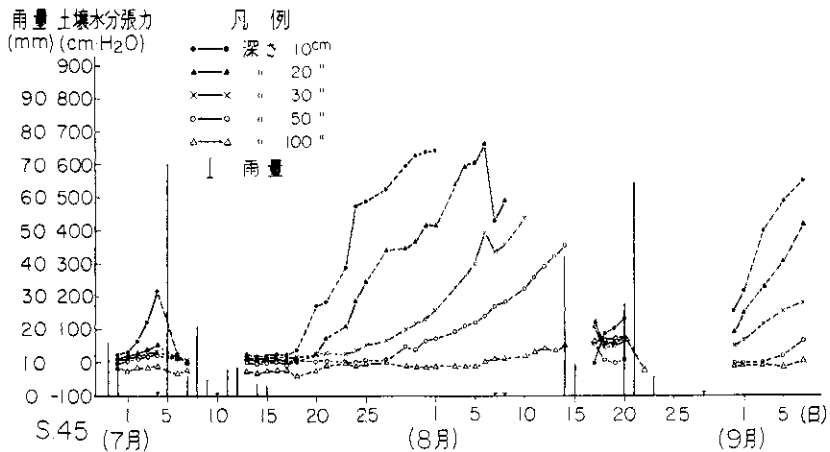


図5 土壌水分張力の経時変化(四国農試)

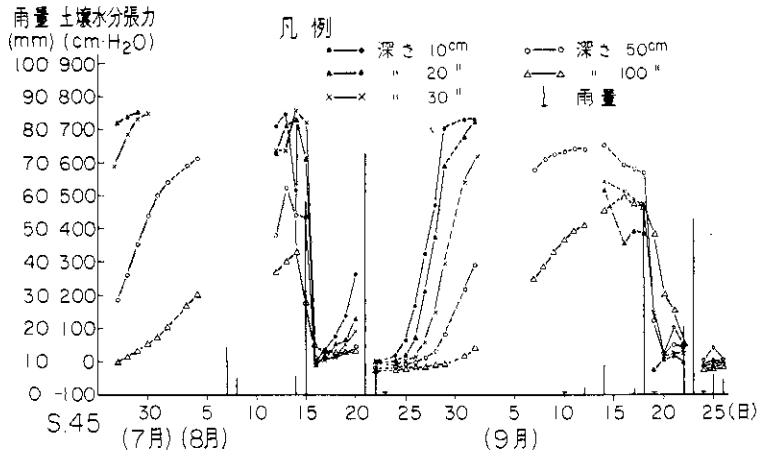


図6 土水分張力の経時変化(安芸津)

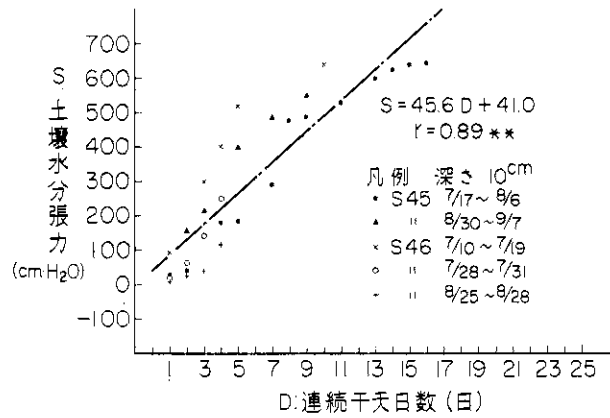


図7 連続干天日数と土水分張力(四国農試その1)

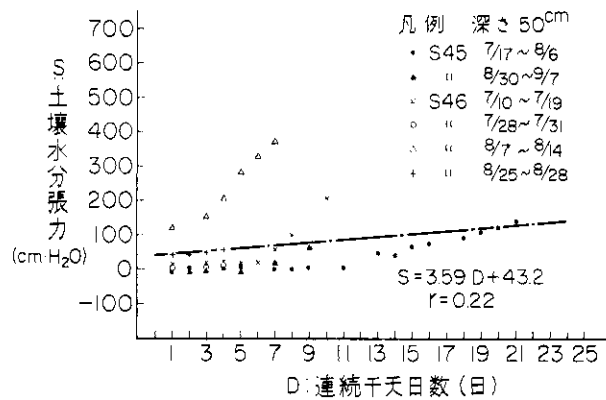


図8 連続干天日数と土水分張力(四国農試その2)

4. 測定結果および解析

1) 土壌水分張力の経時変化

測定された土壌水分張力の一例を図5および図6に示す。テンシオメータの測定可能限界は一般に $pF 2.8$ と云われるので、大略 $700 \text{ cm H}_2\text{O}$ 以上の値は信頼性に乏しい。また、冬期は計器中の水が凍結するので測定は不可能である。なお、図示した値は四国農試ではNa 1~Na 5、安芸津ではNa 1~Na 9の平均値である。

土壌水分張力は一般に $pF 1.7$ ($50 \text{ cm H}_2\text{O}$) 以下では過湿で排水を必要とする状態とされ、 $pF 3$ ($1000 \text{ cm H}_2\text{O}$) 前後に生長阻害水分点があると云われ、このとき、水不足の兆候が現われ、正常な生長が阻害され始めるものとされている。また $pF 4.2$ (15 気圧) は永久しおれ点と呼ばれ、これ

以上の水分張力においては、植物は枯死すると云われる。土壌水分状態の年周変化をみると、4月下旬から5月中旬にかけて次第に乾燥に向うが、6月の梅雨中はほとんど湿潤状態に経過し、梅雨明けから、急速に乾燥状態に向い、9月末~10月上旬の秋雨まで、この乾燥状態は時折り降雨に中断されながらも、基本的には継続することが観察される。続く秋雨による湿潤化の後には、それ以後の蒸発散強度が小さいこともあって、極端な乾燥状態は出現していない。

降雨による土壌水分張力の変化については、春秋で 15 mm 、夏季の乾燥の激しい時でも 30 mm 程度の降雨があれば、地表下 1 m までの土壌水分張力が $50 \text{ cm H}_2\text{O}$ 以下となる。

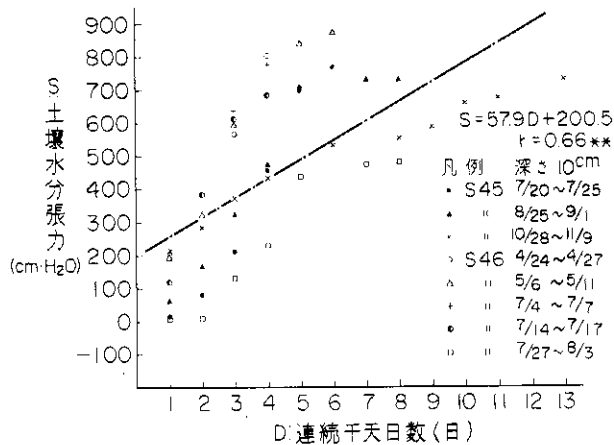


図9 連続干天日数と土壌水分張力(安芸津, その1)

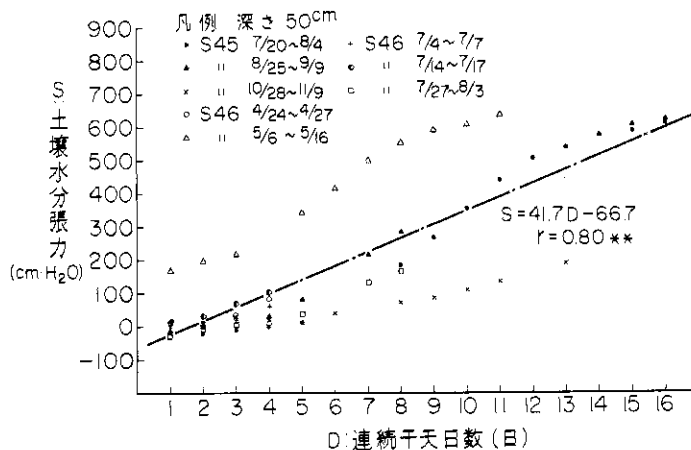


図10 連続干天日数と土壌水分張力(安芸津, その2)

2) 連続干天日数と土壌水分張力

地表からの深さ10, 20, 30, 50, 100 cmにおける土壌水分張力と連続干天日数との関係を図によって求めてみたが、ここにはそれらのうち両試験地における10 cmおよび50 cmでの結果を示す。(図7~図10)。連続干天日数と土壌水分張力との関係に直線回帰式をあてはめることは散布図から見ると必ずしも妥当でないが、一応の目安として、図に示してある。なお、図中のrは標本相関係数を示し、**印は母相関係数 $\rho=0$ の検定において、高度に有意であることを示す。

テンシオメータの特性を考慮して、一応700 cm

H₂Oの示度を基準に考えれば、この示度に達するのに要する連続干天日数は、この回帰直線によると、四国農試ホ場では10 cm 15日、20 cm 23日、50 cm 20日となる。ただし、これらの値は回帰直線による平均的傾向を表わすものであり、盛夏期においては、当然、より早く700mmH₂O示度に達するものと考えられる。また、観測期間中の連続干天日数は13~21日であるから、測定された値から、昭和42年のような80日も及ぶ長期連続干天の状態を推測することは困難である。しかしながら、果樹においても根圏は通常50 cm程度であるから、安芸津ホ場の様な果樹園においても20日程

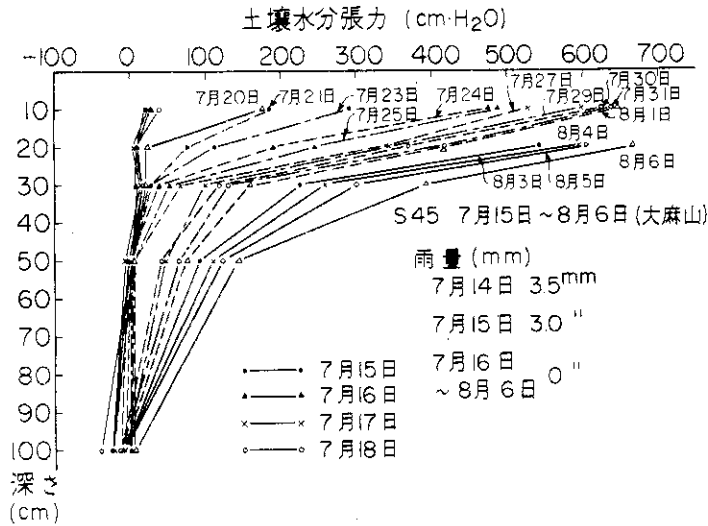


図11 土壌水分張力プロファイルの経時変化(四国農試, その1)

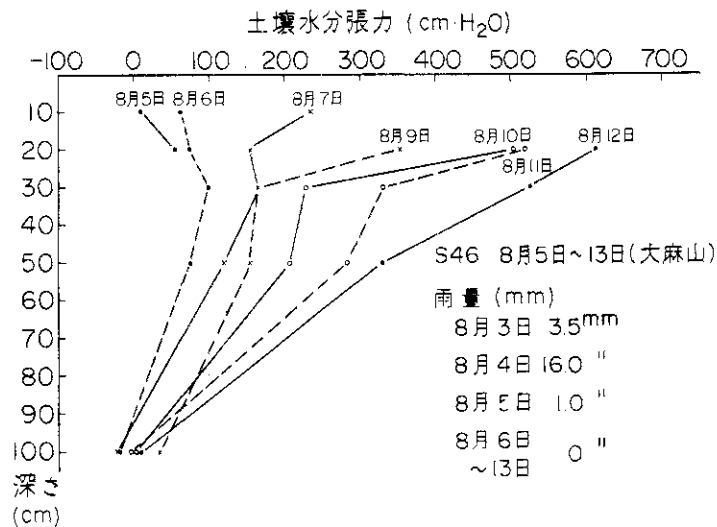


図12 土壌水分張力プロファイルの経時変化(四国農試, その2)

度の連続干天で、根圏内の水分張力はかなり高くなり、初期の水分不足の兆候が現われると推定される。四国農試ホ場では深さ30 cm以下の土壌水分張力の上昇がかなり遅い。これはホ場が山麓の下部に位置し、地下水面が比較的高く保たれるため、下方からの水分補給が多いためと考えられる。一方、安芸津ホ場においては、深さ1 m、間隔11 mの浅層暗キョの外、盛土・地山境界に深層暗キョが埋設されているため、それらによって、地下水が排除され、地下水からの水分補給量が少なく、そのために土壌水分張力の上昇が速いものと推察される。

3) 土壌水分張力のプロファイル

四国農試ホ場および安芸津ホ場の土壌水分張力の鉛直分布が無降水によってどのように経日変化

するかを図によって検討してみた。ここではそれぞれ2例ずつ示しておく。なお、図示した値は各測点の平均値である。

四国農試ホ場の特徴は深さ100 cmの土壌水分張力が極めて低く保たれ、10日程度の連続干天日数においては土壌水分が常にほぼ飽和に達していること、および深さ50 cmの土壌水分張力も連続干天4~12日間ではほぼ0にとどまり、50 cmの土壌水分張力が上昇し始めると同時に、深さ30 cmの土壌水分張力も急速に上昇する傾向を示すことである。これらは明らかに、地下水位の高い時期における土壌水分張力プロファイルの類型を示すもので、事例も多い。一方、少事例であるが図12に示すように、深さ50 cmの土壌水分張力がやゝ高い時期には土層全体の乾燥化も速い。

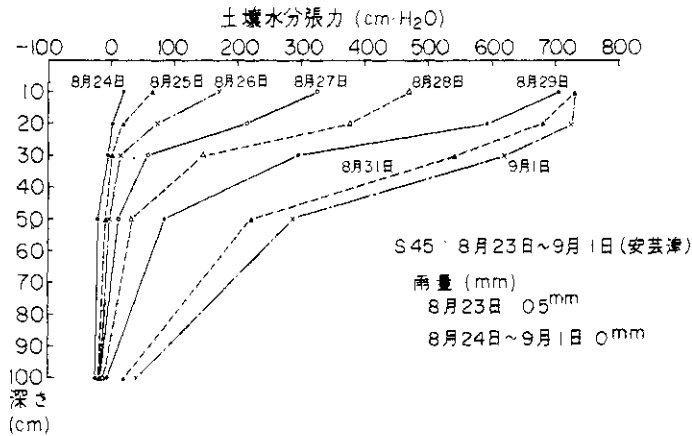


図13 土壌水分張力プロファイルの経時変化 (安芸津, その1)

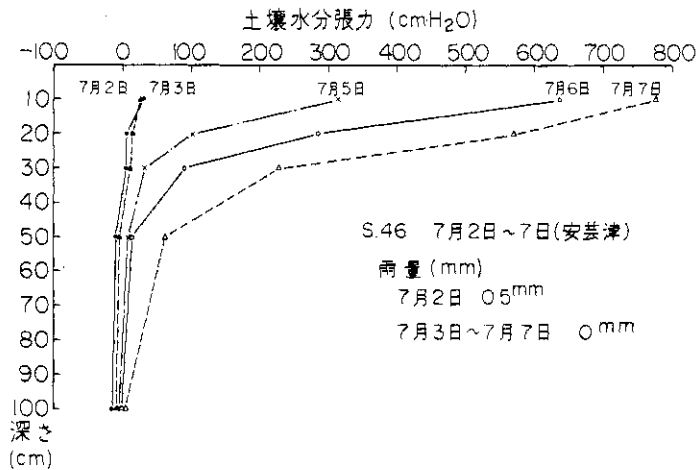


図14 土壌水分張力プロファイルの経時変化 (安芸津, その2)

安芸津ホ場においても、深さ1mの土壤水分張力は、通常、低く、8月上旬、中旬、下旬および5月中旬の時期においてのみ200~350cmH₂Oに達している。

土壤水分張力の鉛直方向の勾配は10~30cmの深さで、10~30であり、年に数回発生する程度の連続干天においては15~20の事例が多い。深さ50~100cmでは大きい時で8程度、やゝ大きい時で3~6であり、1以下の場合が多い。重力による動水勾配は周知のように-1であるから、土壤水分張力の鉛直方向の勾配が1以下になると水分は重力によって、下方に移動することとなる。深さ50cm、100cmの水分張力の動向から推察すると、深さ50~100cmにおいては一時的な中断を除けば5月下旬から7月上旬まで、および9月下旬から12月下旬までの間は水分の下降状態が続くものと考えられる。また、7、8月の盛夏期においても、40~50mm以上の降雨のある場合においては降雨後5~10日の期間は水分の下降運動が続くことが観察される。

4) 土壤水分張力の変化と土性および局所地形

粗粒質土壤は保水性に乏しく、植生状態においては、降雨後、速やかに土壤水分張力が上昇することは周知のことであり、また、石礫に富む土壤も、土層としての保水力が小さく、粗粒質土壤と同様の傾向を示すことも良く知られている。

局所地形による土壤水分張力変化の相異は、下層の水分貯留状態が表層の土壤水分張力の変化に大きな影響を及ぼすことから推察される。四国農試ホ場の事例は、このホ場が大麻山山麓のかなり下部に位置するため、山体上部からの地下水流動がかなりあり、梅雨時に山体に貯留された水が徐々に流下して、7月中旬からの連続干天時においても、長期間、地下水位が高く保たれ、深さ100cmの土壤水分張力が極めて低い値にとどまる状況を示している。

局所地形として影響を持った性質は地表勾配、斜面上の位置、凹凸等であると観察される。斜面上の位置とはホ場が斜面の上部に位置するか、下部に位置するか、換言すれば、尾根部または頂部に位置するか、谷部に位置するかである。一般に、尾根部が谷部に比して、より乾燥的であることは常識的に推察されるとおりであるが、乾燥程度の差異は、土壤の透水性、地表の凹凸、植生状態などによって異なる。土壤の透水性が小さく、地表の凹凸が少なく、植生の被覆も少ない場合は、降雨はすみやかに流出し、深層に到達する機会は少ないから、心土層はかなり恒常的に乾燥的になる。一方、谷部では、一般に地下水位が高く、下方からの水分の補給が多いこと、降雨による流去水が集中して、十分に土壤を湿潤にする機会を与えるため、湿潤の傾向を持つ。ただし、地表流出水に

表-5 安芸津ホ場の水収支(昭45.9月~46.8月)

期 間	日数 (日)	雨量 (mm)	表面 流出 (mm)	浅層 流出 (mm)	深層 流出 (mm)	消 失 量 (mm)	土 壌 水 分 変 化 量 (mm)	損 失 量 (mm)	計 器 蒸 発 量 (mm)	損 失 比	日 当 損 失 量 (mm/日)	摘 要
S45. 9.1-9.29	29	105.5	34.09	9.59	19.27	87.55	21.34	66.21	87.8	0.754	2.28	水収支ホ場 面積 A = 2.54 ha 内訳 ha ブドウ1.42 カキ 0.82 道路他0.21
9.30-10.31	32	130.5	20.26	14.46	34.81	60.97	-8.38	69.35	72.8	0.953	2.17	
11.1-12.1	31	67.5	2.66	1.07	12.63	51.14	7.54	43.60	49.7	0.877	1.41	
12.2-12.31	30	34.5	1.13	0.20	8.35	24.82	-0.61	25.43	36.3	0.701	0.85	
S 46. 1.1-4.5	95	122.5	8.41	1.52	13.63	98.94	2.34	96.60	168.4	0.574	1.02	
4.6-5.3	28	72.0	7.10	1.02	8.98	54.90	-18.41	73.31	85.6	0.856	2.62	
5.4-6.2	30	141.0	21.37	9.18	10.15	100.30	14.95	85.35	87.4	0.977	2.85	
6.3-6.30	28	186.5	46.97	20.41	33.10	86.02	0.62	85.40	66.5	1.284	3.05	
7.1-8.3	34	224.5	80.39	16.92	32.77	94.42	-22.04	114.46	111.9	1.023	3.37	
8.4-8.31	28	92.0	2.05	0.48	1.43	78.04	13.77	64.27	104.9	0.613	2.30	
計	365	1221.5	224.43	74.85	118.51	737.10	13.12	723.98	871.3	0.831	1.98	

- 注) 1. 消失量=雨量-表面流出-浅層流出-深層流出
 2. 損失量=消失量-土壤水分変化量
 3. 損失比=損失量/計器蒸発量
 4. 計器蒸発量はφ20cmの蒸発計蒸発量の値

より、細粒質土壌が流れ去り、粗細質土壌のみ残っている場合においては、土壌の保水性が小さいため、谷部においても、表層が乾燥的になる場合もある。

斜面上の位置による土壌水分張力変化の相異は安芸津ホ場において、より顕著であったが、四国農試ホ場においては谷部の粗細質土壌による影響が見られた。

5. 水収支

安芸津ホ場における昭和45年9月1日から46年8月31日までの1年間の水収支を表-5に示す。降雨量に対する流出量は40%、損失量は60%である。流出量の内訳は表面流出19%、浅層暗キョ流出6%、深層暗キョ流出15%であり、浅層暗キョ流出と深層暗キョ流出との和が表面流出をわずかに上まわっていることは注目ししょう。表中の降雨量および蒸発計蒸発量は試験ホ場に隣接する気象観測露場での測定値であり、土壌水分の変化量はテンシオメータの読み値をpF水分曲線を用いて含水率に換算し、計算したものである。

表から明らかのように、表面流出を除き、全降雨量のはほぼ80%（実際には遮断量も除外すべきであり、80%より若干小さな値）は何らかの形で土

壌中を移動したものであり、水文循環における土壌の重要性が明示される。

なお、表中の損失量は蒸発散量と深部深透量との和であるが、水収支ホ場の原地形および土壌から判断し、また原地盤との間に暗キョが埋設されていることを考慮すれば、深部深透量は少なく、大部分は蒸発散量であると推定される。

6. 干ばつ時における土壌水分動向の予測

1) pF値変化による統計的推定

気候上から盛夏と考えられる7月中旬から9月中旬までの間で、重力による水分の移動がほぼ停止すると考えられるpF 2以上の土壌水分張力を示し、かつ、テンシオメータの示度が信頼できると考えられるpF 2.8以下の土壌水分張力の期間を選び、日当りのpF値の変化量を抽出すると、安芸津ホ場においては深さ20cmで 0.23 ± 0.10 、30cmで 0.20 ± 0.11 、50cmで 0.115 ± 0.075 （ただし、土の後は標準偏差の値。試料は7~12個）となる。この値を用い、更に、先に示した、連続干天日数とpFとの関係を初期値として用い、連続干天が更に続いたと仮定した場合のpF値の推定値を表-6に示す。

表-6 連続干天時におけるpF値の推定

(安芸津ホ場)

深さ (cm)	初期 pF	同左に対する連続干天日数 (日)	15日	20日	25日	30日	摘 要
20	2.78	9	4.16	—	—	—	$\Delta pF = 0.23 pF/day$
30	2.78	11	3.58	4.58	—	—	$\Delta pF = 0.20$ "
50	2.78	16	—	3.24	3.82	4.39	$\Delta pF = 0.115$ "

一般に、pF値と土壌の含水率は比較的線形関係にある。安芸津ホ場の土壌においては、pF 2~4の間で、含水率が8%変化するから、含水率の変化率は4%/pFである。上記の $0.23 pF/day$ 、 $0.20 pF/day$ 、 $0.115 pF/day$ の加重平均値 $0.198 pF/day$ は0~50cmの土層の水分変化に換算すると $0.198 \times 500 \times 0.04 = 3.96 mm/day$ となるから、ほぼ妥当な値と考えられる。

前掲の表によると、深さ20cmにおいては15日、深さ30cmにおいては20日、深さ50cmにおいては30日程度の連続干天で、永久しおれ点(pF 4.2)に達すると推定される。しかしながら、実際には

土壌水分張力が上昇するとpF 3付近から、植物の蒸発散量は減少し始めると云われており、また、根群の水分吸収パターンも乾燥時には変化して、pFの低い領域から、より多くの水分を吸収するであろうから、各深さにおける永久しおれ点への到達は表による推定値より遅れるであろう。いずれにしろ、連続干天30日程度では表土層のかなりの部分は永久しおれ点に近づくと考えられ、また、連続干天30日はこの地方の10年に一度程度の出現確率を有する連続干天であることを考慮すれば、干ばつ回避の対策が必要とされよう。

一方、四国農試ホ場においては1日当りのpF

の上昇値は深さ20cmで 0.123 ± 0.04 , 30cmで 0.132 ± 0.06 , 50cmで 0.076 ± 0.045 (土の後の値は標準偏差。試資料は5~8個)である。この値に基づいて、安芸津ホ場と同様の推定を行なうと表-7のようになる。

表-7 連続干天時におけるpF値の推定

(四国農試ホ場)

深さ (cm)	初期 pF	同左に対する連続干天日数 (日)	20日	25日	30日	35日	40日	45日	摘 要
20	2.78	19	2.90	3.52	4.13	4.75	-	-	$\Delta pF = 0.123 pF/day$
30	2.48	19	2.61	3.27	3.93	4.59	-	-	$\Delta pF = 0.132 "$
50	2.00	13	2.53	2.91	3.29	3.67	4.05	4.43	$\Delta pF = 0.006 "$

土壌のpF 2~4 における含水率の変化は10%であるから、pF 値1の変化に対し土壌水分は5%変化する。また、1日当りのpF 値の変化量の加重平均は0.116であるから、これに対応する土壌水分の変化量は0~50cm土層に対し、29mm/dayである。この値は安芸津ホ場の値より、やや小さいが、繁茂していない牧草の値としては妥当と考えられる。

表中のpF 値によると、表土層では連続干天35日程度で永久しおれ点に達すると推定される。これは、調査時点の植生状態の下で比較すると、四国農試ホ場の方が安芸津ホ場より、干バツにかかりにくいことを示すものと理解される。

2) 土層の水収支によるpF 値の変化の推定

表層1mの土層について水収支を行ない、連続干天時における土壌の含水率とpF 値の推移を予測する。

四国農試ホ場、安芸津ホ場共0~1m土層の土壌水分保留特性は図に示すように、深さ別に大きな差異はないから、平均的傾向として、両者共、深さ50cmの曲線を0~100cmの平均値とみなし、

計算を行なった。含水量の初期値としては、連続干天日数pF 関係の回帰直線の10日における土壌水分張力の値を読み取り、pF 値になおし、更に前述のpF 含水率曲線を用いて含水率に変換し、各深さの含水率とし、それを用いて0~100cmの含水量を求めた。

0~100cmの土壌水分の日当り減少量は従来の実測値3~5mm/dayを参考にし、干バツ時には蒸発散強度が減少することおよび下方からの水分補給を考慮し、1, 2, 4mm/dayの3水準において計算した。

四国農試ホ場においては石礫が多く、調査によると体積含有率で58%であるから、(3)式を用いて、含水率の補正を行ない、pF 値を求めた。

$$\theta = \theta_0 - \frac{nE}{(1-g)H} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 θ_0 :初期含水率、E:1日当りの土壌水分減少量(1, 2, 4mm/dayとする)、g:土層の石礫含有率(体積率)、H:対象土層厚(1000mm)、n:連続干天日数(day)。

上記の条件でpF 値の推移を計算すると表-8、

表-8 連続干天時における含水率とpF 値の推定 (安芸津ホ場)

干天日数 区分	10日	20日	30日	40日	50日	60日	70日	80日	摘 要
	含水率	0.363	0.353	0.343	0.333	0.323	0.313	0.303	
	0.363	0.343	0.323	0.303	0.283	0.263	0.243	0.223	E = 2 "
	0.363	0.323	0.283	0.243	0.203	0.163	0.123	0.083	E = 4 "
pF 値	2.48	2.91	3.16	3.37	3.57	3.78	3.98	4.18	
	2.48	3.16	3.57	3.98	4.39	-	-	-	
	2.48	3.57	4.39	-	-	-	-	-	

表-9 連続干天時における含水率とpF値の推定(四国農試ホ場)

干天 日数 区分	10日	20日	30日	40日	50日	60日	70日	80日	摘 要
含水率	0.368	0.357	0.347	0.336	0.326	0.315	0.304	0.294	$E' = 1.06 \text{ mm/day}$
	0.368	0.347	0.326	0.304	0.283	0.262	0.241	0.219	$E' = 2.12 \text{ "}$
	0.368	0.326	0.283	0.241	0.198	0.156	0.113	0.071	$E' = 4.24 \text{ "}$
pF 値	1.62	1.85	2.08	2.39	2.62	2.83	3.03	3.17	
	1.62	2.08	2.62	3.03	3.32	3.62	3.92	4.23	
	1.62	2.62	2.32	3.92	4.52	—	—	—	

注) $E' = E / (1 - g)$

表-9のようになる。これらの表によると、安芸津ホ場においては1mm/dayで80日、2mm/dayで45日、4mm/dayで28日程度の連続干天で0~100cm土層の水分張力が永久しおれ点付近に達し、四国農試ホ場においては1mm/dayで80日以上、2mm/dayで78日、4mm/dayで45日程度の連続干天で同様に永久しおれ点に達する。

この計算の仮定は植物が0~100cm土層から一様に吸水することであるが、実際にはこのようなことは起りえず、多くの作物において、0~20cmの土層からの吸水量が圧倒的に大きいことが知られているから、この計算値は実際には起り得ない程の土壌水分利用可能量を仮定していることとなり、従って、この計算値より早く、永久しおれにおちいることが現実的である。この様に土壌水分利用可能量を極限まで拡大したとしても1mm/dayの土壌水分減少少量で、辛うじて、80日の連続干天に耐えることができ、2mm/dayでは45日(安芸津ホ場)~78日(四国農試ホ場)で、既に

永久しおれに達する。四国農試ホ場の様に、初期に湿潤であり、かつ、土壌の水分保留量も大きい条件においても、80日にも及ぶ連続干天による異常干ばつは、深根性の植物にとっても枯死を免れる限界であると推察される。

7. 土壌水分の下方からの補給量の推定

1) 下方からの補給量の観測

安芸津ホ場において、テンシオメータの読みから、深さ50cmにおける動水勾配が上向きに1.0より大きい時期を選び、(4)式によって下方からの水分の補給強度を計算した。

$$V_2 = V_1 + \int_0^{h_0} \frac{\partial \theta}{\partial t} dh \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 θ :体積含水率[cm^3/cm^3], h :地表面からの深さ[mm], h_0 :500mm, t :時間[day], V_1, V_2 :地表および深さ h_0 における水分フラックス[mm/day]

V_1 は蒸発散度強度 E_T とし、これは計器蒸発強

表-10 E_T/E_p の値(平塚, 農土試ライシメータ, 関東ローム, 1.5m×6m 勾配20°)

年度	ライシメータ	6月	7月	8月	9月	10月	摘 要
昭 45	1	—	—	0.60	0.92		雑草
	2	—	—	0.61	0.80		雑草
昭 46	1	1.01	1.13	0.91	0.84		牧草(イタリアンライグラス, オーチャードグラス)
	2	0.70	0.60	0.70	0.83		裸地
昭 47	1	1.12	1.37	—	—	—	牧草(イタリアンライグラス, オーチャードグラス)
	2	0.61	0.95	—	—	—	裸地

度 E_p (ϕ 20 cm) に係数 (E_T/E_p) を乗じて推定した。係数 (E_T/E_p) は水収支の損失比を、ライシメータによる実測値²⁾を考慮して、若干、修正して用いた。ライシメータによる実測値は表-10 に示す。

θ はテンシオメータの読みと pF 含水率曲線から求めた。また、深さ 50 cm における動水勾配 S を求め(5)式によって、透水係数 K (mm/day) を求めた。

$$K = V_2 / (s - 1) \dots\dots\dots(5)$$

この様な手順で計算された K はバラツキが大きく、0.1~4 mm/day になる。これらの値は、 V_2 および S の推定にかなりの誤差を伴うから、 K の目安を与えるにすぎない。19個の計算値の中央値は 0.65 mm/day (7.5×10^{-7} cm/s) である。

2) pF・含水率曲線からの透水係数の計算

pF・含水率曲線は土壤の水分を保持する性質を定量的に表示する一つの方法であるが、水分の保持力が毛管の径に関係することから、この曲線を用い、土壤中の孔隙の大きさの分布を推定し、透水係数を計算する試みが種々なされている。

Millington and Quirk の式³⁾ ((6)式)は種々の土壤水分量における透水係数の変化傾向をかなり良く計算できるという報告⁴⁾があるので、この式を用いて、カンバツ時に問題となる pF 3~3.5 における透水係数を推定する。

$$K = 2.33 \cdot 10^8 \cdot \epsilon^{4/3} \cdot n^{-2} (h_1^{-2} + 3h_2^{-2} + \dots\dots + (2n-1)h_n^{-2}) \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 ϵ : 水で満されている孔隙の率、 n : 前記孔隙の等分割数、 h_i : 孔隙分級 i の平均吸引圧 [cmH₂O, 20°C], K : 透水係数 [mm/day],

深さ 50 cm の pF・含水率曲線を用いて計算すると、pF 2 における透水係数は $K_{2.0} = 4.1$ mm/day (4.8×10^{-8} cm/s), pF 3 における値は $K_{3.0} = 0.062$ mm/day (7.2×10^{-8} cm/s) である。

$K_{3.0}/K_{2.0} = 0.015$ である。

3) 下方からの水分補給量の推定

前記の様に、観測による深さ 50 cm における透水係数の平均値は $K = 0.65$ mm/day であり、観測時の土壤水分張力がホ場容水量付近にあったと考えられるから $K_{3.0}/K_{2.0}$ を乗じて、pF 3 付近の透水係数を求めると $0.65 \times 0.015 = 0.01$ mm/day である。

動水勾配は前記のように地表付近で 30 にも達するが、深部においては 5 以下が多い。しかし、か

んばつ時においては深部まで乾燥が進み、地表部にその性質が近づくと考えられるから、動水勾配として 10 程度を考えると、下方からの補給量 $V = K \cdot J = 0.01 \times 10 = 0.1$ mm/day となる。この量は蒸発散量が 3~5 mm/day であることと比較すると、 $1/10$ 以下である。従って、この量で植物体に水を供給し、生育を保つことは不可能であろう。従って、植物が深層の水分を利用する形態としては、深層の土壤水分張力の低い領域へ根自体が伸長して吸水する形態以外には、蒸発散量に匹敵する吸水を確保することは不可能と思われる。

8. 結 言

瀬戸内地方の二つのホ場で土壤水分の動態を追求し、次のことが明らかにされた。なお、両ホ場共、土壤の保水性は中位ないし良好であり、地下水位は四国農試ホ場では高く、安芸津ホ場では中位であった。

①傾斜畑面の草地および樹園地における土壤水分の動態をテンシオメータの読みから追求し、年間変化、深さによる変化、連続干天による変化の実態を明らかにした。

②安芸津ホ場においては水収支を行ない、降雨の流出損失、保留の実態を明らかにした。

③干天時における土壤水分張力の変化から、連続干天日数と pF との関係性を推定し、干害の発生し始める干天日数を推定した。

④土層の水収支から、連続干天時における土壤水分張力の推移を検討し、異常干ばつ時においては好条件の立地においてもかなりの干害を被るであろうことを推定した。

⑤干ばつ時においては、下方からの水分補給は土壤の透水性からみて、少なく、それによって植物体の生育を保つことは困難であると察せられた。

⑥上記の結果からも明らかのように、平均的な立地条件(安芸津ホ場)では数年に 1 回程度の連続干天に耐えるのみで、これより、強い干ばつ時にはかん水を必要とする。しかし、土壤の保水性が良好なことは数年に 1 回程度の干ばつにおいては、かなりの効果を発揮するものと考えられる。

⑦傾斜地においては、土壤の局所の変量が大きい。特に下層土の変量および基岩の深さの変異が大きく、土壤水分の変化も、表層土壤の水分がかなり斉一的な変化を示す外は、きわめて局所の変異が大きい。このことは、表層かんがい計画以外

は一般的計画がきわめて困難であり、局所的変異を考慮した個別的計画による必要があることを示すものと理解される。

参 考 文 献

- 1) 東海近畿農業試験場畑作部 (1968): 昭和42年西日本干ばつ被害調査報告書
- 2) 上村春美他 2名 (1972): 斜面ライシメータにおける水収支の研究, 農業土木試験場技報 A 9
- 3) Millington, R. J., and J. R. Quirk (1959): Permeability of porous media, *Nature*, 183, 387-388.
- 4) R. D. Jackson and others (1965): Comparison of Measured and Calculated Hydraulic Conductivities of Unsaturated Soils, *Water Resources Research* vol. 1 No. 3, 375~380