

?.少水分時の土壤水分移動について

著者	湯村 義男, 佐藤 雄夫, 安田 環, 石原 暁, 大崎 亥佐雄, 元木 征二
雑誌名	防災科学技術総合研究報告
号	34
ページ	75-92
発行年	1974-03-30
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002707/

干ばつ時における限界かん水量に関する研究

Ⅲ. 少水分時の土壌水分移動について

湯村義男・佐藤雄夫*・安田 環・石原 暁

大崎玄佐雄⁺・元木征二⁺

農林省東海近畿農業試験場畑作物部

Characteristics of Consumptive Use of Water, Irrigation Method and Water Behavior in Desiccated Soil Condition

Ⅲ. Movement of Soil Moisture in Desiccated Soil Condition

By

Yoshio Yumura, Yuo Sato*, Tamaki Yasuda, Akira Ishihara,

Isao Osaki⁺ and Seiji Motoki⁺

Tokai-Kinki National Agricultural Experiment Station, Tsu

Abstract

Movement of soil moisture in less moisture condition consists of capillary and vapory flows. In the present paper, the distribution pattern of soil moisture with temperature gradient, and the soil moisture suction corresponding to lento-capillary point are studied. And, air permeability and water intake through the soil surface with crust were measured. Results are summarized as follows:

1) Soil moisture moves from the warm part to the low temperature part in the closed soil column of 1 metre in length and 0.36°C in temperature gradient during the period of 5-6 days.

2) Lento-capillary points in eight kinds of soil are measured by the methods of wetting and drying processes, and the corresponding values of soil moisture suction are in the range of about 0.5-8.0 bars, and a large portion of corresponding suction is 2.5 bars.

3) Coefficient of air permeability through the soil surface with crust is measured with Evans' apparatus and is 17 darcys, whereas those of soil conditioner or cultivated, are in the range from about one-sixth to one-seventh (taketooyo red-yellow soil, sandy clay loam or light clay).

目	次
1. まえがき.....	76
2. 温度勾配が大きいときの土壌水分の移動.....	76
1) ねらい.....	76
2) 実験法.....	76
3) 結果と考察.....	76
3. 畑地(武豊)における土壌温度の実態.....	78
1) 測定法と供試圃場.....	78
2) 結 果.....	78
4. 温度勾配下の土壌水分分布.....	78
1) ねらい.....	78
2) 実験法.....	79
3) 結 果.....	80
4) 考察および問題点.....	82
5. 土壌水の毛管移動の遅滞について.....	83
1) ねらい.....	83

* 現在：福島県園芸試験場

+ 北海道立天北農業試験場(昭和45年度依頼研究員)

* 北海道立道南農業試験場(昭和46年度依頼研究員)

* Present address: Fukushima Horticultural Experiment Station.

+ Hokkaido Prefectural Tenpoku Agricultural Experiment Station.

* Hokkaido Prefectural Donan Agricultural Experiment Station.

2) 実験方法および結果	83
3) 考 察	87
6. 土面の状態と土壌通気性および浸入水量	
.....	87
1) ね ら い	87

2) 現場通気性測定装置および操作法	88
3) 現場通気性測定法の検討	89
4) 結果と考察	89
7. 摘 要	91
引用文献	92

1. ま え が き

わが国の盛夏時や干ばつ時など、比較的少水分時の土壌水の移動形態としては、毛管移動のほかに蒸気態移動が考えられる。本報では、まず、耕土層内の土壌温度勾配の実状にちかい温度勾配下の土壌水分分布を各種条件下で実測した。

ついで、毛管移動については、土壌の脱水がすみ、毛管伝導速度が減少し、作物の吸収と消費に見合うだけの水分を供給できなくなる含水状態が、干害との関連でも重要であると考え、いわゆる難動毛管点（毛管連絡切断含水量）を、各種土壌について、2つの方法で測定し、それらの含水量に対応する水分張力について検討した。

さらに、水滴の衝撃と蒸発にともなう生ずるクラスト（土膜）は、クラック（亀裂）をもっているが、それ自身はきわめて緻密な構造を有して土面を覆うので、以後の蒸発を抑制する役割を果している。しかしその一面では、堅硬なため種子の出芽を不揃いにし、かつ雨水やかんがい水の表面流去を増して、浸入を阻害する。その程度は、クラストの構造と組織に左右されるが、クラストそのものがうすいためその測定には困難がともなう。本報では、クラストの物理性を総合的に判定する手段として、土面の通気性を測定した。

以下、これらの実験結果を簡単に報告する。

2. 温度勾配が大きいときの土壌水分の移動

1) ね ら い

土壌水分の蒸気態移動が、毛管伝導に比較してどの程度期待できるかについて、概括的な知見を得ることを主なねらいとして、まず比較的大きな勾配下での土壌水分移動量を密閉系室内実験で検討した。

2) 実 験 法

(1) 実験規模

直径 7.5 cm、高さ 5 cm の真鍮製円筒を2段重ねた密閉系、2 反復

(2) 供 試 土

武豊土壌表土（新第三紀層をおおう洪積堆積物

に由来する赤黄色土、Ap 層）、砂質埴壌土、粘土（ 2μ 以下）22.5%，シルト（ $20\sim 2\mu$ ）18.6%，有機態炭素 0.5%。

(3) 処 理

図1のように、上下の土柱の境を連続、不連続（上下両土柱の間に空間をつくって毛管連絡を完全に遮断）の2処理とした。

実験開始時の試料含水比は、上部多水分（16.5%）一下部少水分（10.3%）、上部少水分一下部多水分、および両部共中水分（13.5%）の3処理とした。

温度勾配は4処理とした。そのうち2処理は、図1のように、上部低温（ 20°C ）一下部高温（ 28.5°C ）、上部高温（ 29°C ）一下部低温（ $20.5\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）とした。他の2処理は、 20°C 恒温室または 29°C 恒温室に放置して、上下部共低温（ 20°C ）、上下部共高温（ 29°C ）とした。

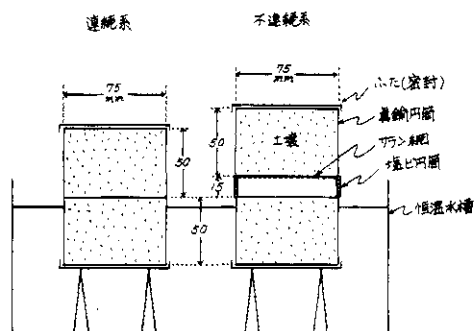


図1 実験方法（恒温室内にて）

どの処理の場合でも、アルミ製ふたをビニールテープとパラフィンで密封し、外界との水の出入りはなくした。

(4) 移動水分量の測定

1週間放置後、上部円筒の上端および下部円筒の下端から、厚さ約 2 cm の試料を採取して含水比を測定し、実験開始時の含水比との差をもって、移動水分量とした。

3) 結果と考察

実験結果をまとめて図2に示した。図2のaは、

不連続試料を 20°C および 29°C 恒温室内の実験台上に、それぞれ1週間放置(試料の上下は等温条件)した場合の水分移動状況である。実験開始時における試料各部の含水比のバラツキが $\pm 0.2\%$ あったので、増減の絶対値の合計 0.4% 以内は、実験誤差とみなされる。したがって、図2aの 20°C の場合の実測増減量は、誤差範囲にぞくす。しかし、 29°C で上部少水分一下部多水分の場合には、多水分側から少水分側への水分移動を認めることができる。この場合の移動は、等温条件下の毛管凝縮による水蒸気態移動と考えられる。すなわち、メニスカスの曲率が大きい(毛管半径が小さい)ほど、メニスカス直上の飽和水蒸気圧は低くなるので、密閉系で関係湿度が 100% の場合には、曲率の大きいメニスカスで凝縮が起こり、その量に相当する水蒸気は曲率の小さいメニスカスから補給される結果として、土壤水分が移動することになる。pF 4以下に対応するメニスカス直上の飽和水蒸気圧は、すべて関係湿度 99% 以上なので、本実験の多水分(pF 2に相当)と少水分(pF 3.7に相当)とのそれぞれメニスカス直上の飽和水蒸気

圧勾配は、實際上極めて小さく、したがって、本実験で得られた水分移動量は、あまり大きい値とはならなかったと考えられる。

温度勾配がなく、試料が上下連続している場合の水分移動状況は、図2のbである。この場合には、いずれ也多水分側から少水分側へ移動し、垂直的方向性および温度の高低の影響は認められない。この移動形態は、等温条件下における毛管伝導と考えられるが、その移動量は、1週間に含水比が $0.6 \sim 0.8\%$ 増加するに過ぎず、毛管伝導速度は小さかった。毛管移動には、毛管圧勾配、毛管半径、距離、水の粘性、および毛管水膜の連続性が関与する。この場合の張力勾配はpF 2から3.7と大きいので、移動が少なかった原因としては、管内抵抗や毛管の連続性などが考えられる。

両土柱間に空間をおき、毛管連続を遮断し、上下に温度差がある条件下(図2のc)では、含水比勾配には関係なく、すべて高温側から低温側へ多量の水が移動している。これは、飽和水蒸気の絶対湿度が、温度によって顕著に変化することから、高温側の水蒸気が低温部へ拡散して凝縮する形態の水分移動を示すものである。図2のbと比較すると、 8.5°C の温度差があるときの水蒸気態移動量は、等温条件下の毛管移動量の10倍前後に達している。

連続土柱で、上下に温度差がある場合(図2のd)では、図2のcと同様に、はじめの含水比の大小をとわず、常に高温側から低温側へ移動しているが、その移動量は不連続の場合より少ない。図2のdの移動要因には、毛管圧勾配による移動(温度毛管作用もふくむ)と水蒸気態移動とがふくまれる。多水分側から少水分側への移動量が、等温条件下よりはるかに多く、また少水分側から多水分側へも移動していることから、温度勾配下の水蒸気態移動の方が、毛管伝導よりも、大きく関与したと見なされる。なお、温度勾配下での移動水分量は、連続土柱区の方が、不連続土柱区よりも少なかったが、この原因として、(1)連続区は真鍮製円筒および内部試料を通じて熱伝導が行なわれ、試料の温度勾配が不連続区と同一でなかったこと(試料内部の温度は実測せず)、および(2)毛管移動が水蒸気態移動を相殺する方向にはたらいと等が考えられる。

水蒸気態移動には孔隙半径が重要だと考えられる。所定含水比ごとに本供試土の孔隙分布を図3

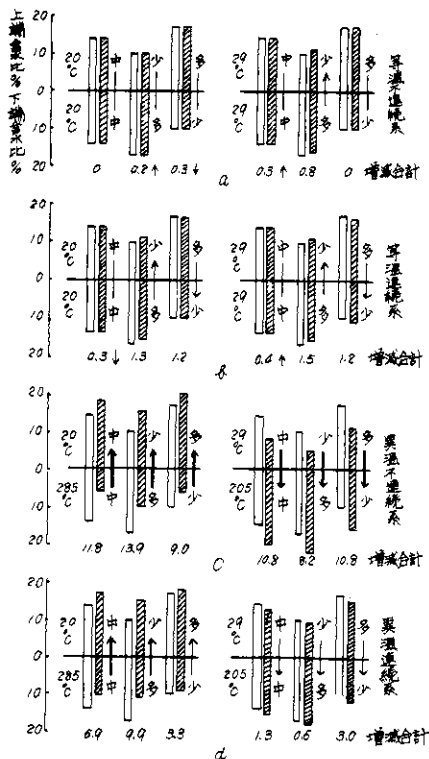


図2 温度勾配および毛管連絡の有無と土壌水分移動

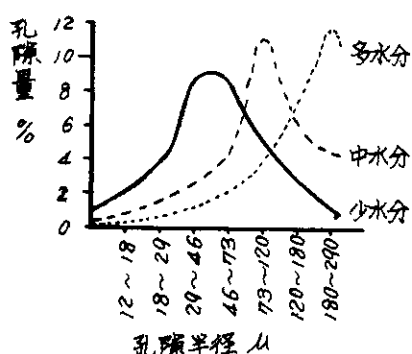


図3 供試土の充填時の水分状態と充填後の孔隙分布

に示した。多水分試料ほど孔隙分布が大きい方にかたむいていたが、少水分試料でもそれほど緻密というわけではなかった。この実験は、重力水排除後を想定して、水分張力 100mbar 以上で行なったが、このような比較的少水分状態における毛管移動は、かなり遅い結果となっており、1日単位でみればほとんど無視されるほどの量である。以上の結果から、張力 1mbar 以下の水分域でも、根群域への水分補給に対し、温度勾配による水蒸気態移動が相対的に大きな役割を果す場合があると考えられる。畑地の根群域付近における垂直的土壤温度勾配の実態については、次節で若干のべる。

3. 畑地（武豊）における土壤温度の実態

1) 測定法と供試圃場

場内 87 圃場で耕土とその次層土の垂直的溫度分布をしらべた。純ニッケル測温抵抗体の抵抗値を電子管自動平衡記録計で連続的に打点記録した。測定は 1971 年 7 月中旬から始めた。感温体は土面より 1, 2, 5, 10, 20 cm の深さに埋めた。

供試圃場はミカン幼木園（3 年生苗を 1970 年 4 月 15 日に植付、大岩 5 号）で、樹間 1.5 m、畦間 2.0 m、栽植密度 33.3 本/a、畦高約 25 cm の密植清耕栽培である。土性層序 SCL/LiC、腐植にとぼしい赤黄色土で、内部排水不良、畦間で測定した。

2) 結果

1971 年 7 月中旬から 12 月までの武豊の清耕ミカン幼木園（無マルチ）の土壤温度の実測結果によれば、深さ 1～20 cm の間での最大温度差は 16°C 、平均温度勾配の最大値は層厚 1 cm 当たり 0.84°C （浅層＞深層）であった（8 月 12 日 13 時）。畑土壌中で蒸気態移動した水が土層中に集まりやすい

のは、表層土ほど低温の場合と考えられる。こういう温度分布は、今回の観測期間では、毎日夕刻から早朝までの夜間に必ず起こっていた。日中は浅いところの方が、深いところ（20 cm 深）より高温なので、毎日夕刻と早朝には、20 cm 以浅で温度勾配の逆転が起こっているわけである。その一例を図 4 に示した。深さ 1～20 cm 間の夜間の温度勾配の最大値は、7～12 月の観測値では、11 月 26 日午前 5～6 時に得られ、その値は層厚 1 cm 当たり平均 0.26°C 、そのときの温度差は約 5°C であった（浅層＜深層）。

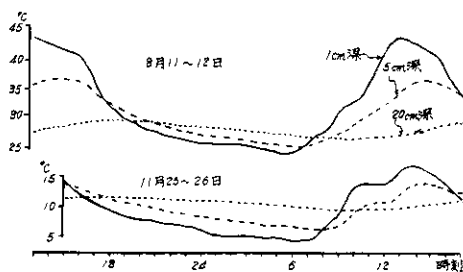


図4 土壤温度の深さ別時期的変化（武豊、ミカン園、1971年）

次節の室内実験で与えた温度勾配（ $0.36^{\circ}\text{C}/\text{層厚 } 1\text{ cm}$ ）は、短期間の観測にすぎないが、一応この実態調査結果を参考にし、当地の作物被覆下の畑地土壌における実際的な温度勾配の最大値として設定したものである。

土壤温度垂直分布は、被覆作物の種類、栽植密度、繁茂度、マルチング、クラスト生成状況等によっても著しく異なる。植物被の少ない裸地では、熱線の遮蔽、吸収、散乱が少なくて土面に達するので、日中の表層土と下層土との温度差は、植物被がある場合よりも大きくなる。一例として、当部作物第 1 研究室の観測値を引用して計算すれば、深さ 1～20 cm の間の土壤温度勾配として、日中 0.74°C （浅層＞深層）、夜間 0.39°C の値が得られている。

4. 温度勾配下の土壤水分分布

1) ねらい

前節では、100 ml 容、高さ 5 cm の土柱を 2 個重ねた密閉系で、その上、下部をそれぞれ 20°C または 29°C としたとき、両土柱の境を毛管的に連続しても、切断しても、はじめの含水比の多少を問わず、土壤水分は高温側から低温側へ移行することを述べた。その実験条件として与えた温度勾配は、

土柱の両端の間で、 $0.9^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ になり、前節の実際の畑地の土壌温度分布から見るとやや大きすぎるようである。本節の実験では、圃場の実態に近い温度勾配を与えた条件下で、土壌の充填密度（仮比重）、含水量、毛管連絡切断位置をかねて検討した。

2) 実験法

(1) 装置

内法長さ120 cm、幅30 cm、深さ25 cmの直方体容器の5方を隔壁をもった水槽でつみ、両端に加温冷却恒温装置をそなえた温度勾配装置を用いた。 2°C 恒温冷蔵室におき、一方の加温装置だけを稼働させ、隔壁を経て、その熱を隣接する水槽に伝え、さらに次の水槽に伝えさせるという方式で、内部の充填物に温度勾配を与えた。充填物には、篩別土を用いた。これだけでは充填物の各深さにおける温度は斉一にならないので、供試土は、内径2.5 cm、長さ100 cmの硬質塩化ビニール管につめて、充填物の中央部において埋めこんだ。充填物には粗砕土を用い、その上面は発泡スチロール板でおおった。

かくして作動中の充填物槽の中央部——すなわち供試土柱の埋設位置外縁——の温度分布は、サーミスター自記温度計によって、土柱（長さ1 m）の暖端で 46°C 、冷端で 10°C 、温度勾配は土柱長さ1 cmについて 0.36°C で、かつほとんど直線状の勾配を保つことを確認した。したがって、暖冷両端の飽和水蒸気圧差は66 mmHgと算定される。

(2) 供試土

風乾篩別土に水を加えて所期の含水量とし、 20°C 恒温室に1週間放置、均一化させてから、所定の充填密度になるよう、内径2.5 cmの塩ビ円筒につめた。次の3つの土壌を供試した。

武豊土壌：愛知県武豊町当場内北圃場。畑。更新統／鮮新統に由来する赤黄色土のAp層。土性SCL。

佐屋土壌：愛知県佐屋町。沖積畑地。Ap層。土性SL。

各務原土壌：岐阜県各務原市。畑。黒ボク土。Ap層。腐植にすこぶる富むCL。

各供試土の所定充填密度における容積重と三相分布を表1に、張力-含水比曲線を図5に示す。

(3) 処理

内径2.5 cm、長さ5 cm、内容積24.5 mlの硬質塩化ビニール円筒に、所定の含水量に調製した土

表1 土壌の供試充填状態

土 壌	容積重 g/ml	固 相 %	液 相 %	気 相 %	孔隙率 %
武 豊	1.50	58.8	20.5	20.7	41.2
	1.20	45.6	18.7	35.7	54.4
佐 屋	1.50	56.8	21.2	22.0	43.2
	1.20	46.1	19.2	34.7	53.9
各務原	0.75	32.0	52.0	16.0	68.0
	0.60	30.4	48.5	21.1	69.6

註) 水分状態pF 2.2として、実容積法により測定

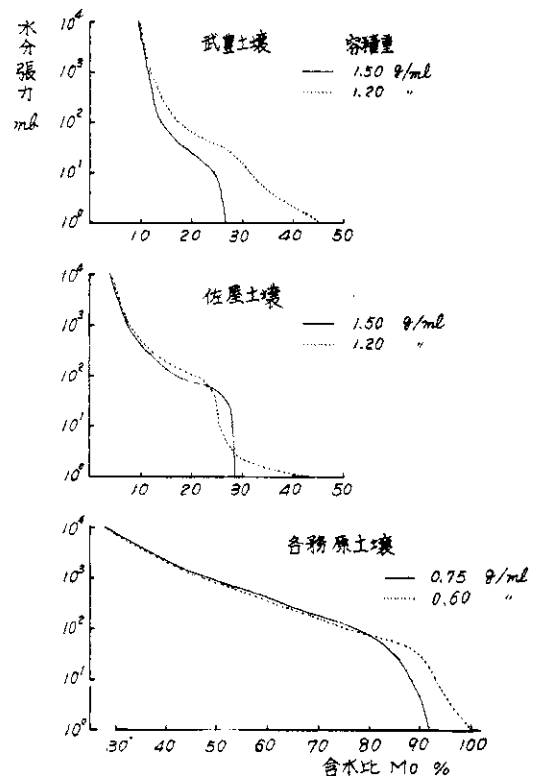


図5 張力-含水比関係

を一定の容積重になるよう充填した。この円筒を20個連結し、ビニールテープできつく接着して長さ1 mとし、両端は密閉した。この土柱を前記の充填物槽の中央に水平に埋設し、温度勾配を与えた。この間、供試土柱そのものの温度は測らず、外周の充填物の温度と同じと見なした。

所定時間後供試土柱を掘り出し、円筒を1個ずつ切りはなし、各セクションのほぼ中央から約1

／5の土を採って、それぞれ含水比を定量し、含水比分布を求めた。

水分回収率は、所定日数後の含水比に対する当初含水比の比率(%)で示し、カラム全体の回収率は、各セクションの含水比の和から算出した。

3) 結 果

この実験の結果は、第2節と異なり、土柱が長い場合の結果なので、水の移動距離が長く、かつ温度勾配による蒸気態移動と、それによって生じた含水勾配を再び均一化させようとする毛管伝導との合成値である。したがって、平衡に達するにはある程度長時間を要するようである。以下の実験では、処理日数を大体5～6日間としたが、10日目でもまだ移動しており、5日間程度では、まだ完全な平衡を得たとは確められない。ただし、実際の圃場の表層土では、1日の周期で絶えず温

度変化しており、降雨、蒸発散等も起こるので、事実上完全な水分平衡に達することはないと考えられる。

当初の土壤含水量と温度勾配下の水分移動との関係を例示したのが表2である。表2の結果は、温度勾配を与えてから5日目の土柱各部(20等分した各セクション)の含水比をはかって、土柱の暖端側半分と冷端側半分の水分賦存割合および土柱全体の水分回収率(放置後／当初)を算出したものである。当初含水比の小さい(気相の多い)ときの方が、暖端側から冷端側に移っている水分の割合は大きい。この傾向は両端部の水分回収率を見ればいっそう顕著で、含水比が小さいほど、暖端部に残っている水分は少なく、冷端部にある水分は多い。

表2 土壤水分含量と温度勾配下の水分分布

(武豊土壤、充填密度乾土 1.50 g/mℓ)

土 柱 の 連 続 性		連 続		不 連 続		
実験 条件	当初含水比 %	4.57	14.42	5.35	10.23	13.42
	相当する水分張力(pF)	> 4.0		> 4.0	3.6	2.2
	気 相 率 %	34	20	33	26	21
実測全回収率 %		100.0	100.6	98.4	98.2	100.0
同上 指数	暖端から 0～50 cm	48.0	49.1	48.3	49.3	49.3
	〃 50～100 cm	52.0	50.9	51.7	50.7	50.7
	全 体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
両端部の 回収率%	暖端から 0～5 cm	74.0	93.3	79.4	79.3	88.5
	〃 95～100 cm	110.5	101.6	109.2	107.0	103.2

表3は、長さ10 cmの均一土柱を両端におき、また長さ15 cmの土柱を中央部において、各土柱の間には、からのシリンダーをはさんだ不連続系での水分回収率である。武豊土壤、各務原土壤とも、温度勾配下に放置後5日目の含水比は、冷端側>暖端側になっている。表4は、含水比と仮比重を同じにして充填、処理後の水分回収率を連続土柱と不連続土柱とで比較したものである。この場合には、全回収率のふれがやや大きかったが、土柱切断の有無による水分移動のちがいは比較的小さく、しおれ点をこえるような少水分時には、毛管移動の影響は小さいことを示している。

図6は、暖端側を多水分、冷端側を少水分として温度勾配を6日間与えた場合、すなわち、夜間

における圃場の土壤水分および土壤温度の勾配を模した場合の水分変化である。暖端側(多水分層)では低温部ほど水分が増加しているが、中間部と冷端側(少水分層)では、逆に高温部(多水分層にちかい)ほど水分が増加した。ただし、この場合は、温度処理をかけた日数が長いので、1日周期で起こる耕土層ないし次層土内の温度勾配の逆転が土壤水分分布の変化に及ぼす影響を正しく反映できたとは言えない。この点についての検討はまだ行っていない。

以上各種の実験条件下で得られた結果から、土柱の連続部分の水分移動量を、各連続土柱両端部の含水比差と回収率差で代表させ、これと当初含水比との関係を整理したのが表5である。表5に

表3 均一な不連続土柱における温度勾配下の水分分布

武 豊 土 壌		各 務 原 土 壌	
暖端からの距離 cm	回収率 %	暖端からの距離 cm	回収率 %
0 ~ 2	89.8	0 ~ 2	71.9
2 ~ 4	93.1	2 ~ 4	84.8
4 ~ 6	99.1	4 ~ 6	91.3
6 ~ 8	100.1	6 ~ 8	95.9
8 ~ 10	104.6	8 ~ 10	121.9
	97.3		93.2
40 ~ 42	88.7	45 ~ 47	86.0
42 ~ 44	92.8	47 ~ 49	89.6
44 ~ 46	97.4	49 ~ 51	95.2
46 ~ 48	98.4	51 ~ 54	97.9
48 ~ 50	101.0	54 ~ 56	102.9
50 ~ 52	106.3	56 ~ 58	106.0
52 ~ 55	111.6	58 ~ 60	115.4
	99.4		99.0
90 ~ 92	99.4	90 ~ 92	91.6
92 ~ 94	99.7	92 ~ 94	98.6
94 ~ 96	100.6	94 ~ 96	100.7
96 ~ 98	100.7	96 ~ 98	100.9
98 ~ 100	100.8	98 ~ 100	108.1
	100.2		100.0
全回収率 %	99.1		97.6

注 1) 当初含水比に対する処理5日目の回収率(%)で示す。

2) 武豊：仮比重 1.50, 当初含水比 10.23%, 各務原：仮比重 0.75, 当初含水比 24.88%

表4 土柱の連続, 不連続と温度勾配下の水分分布

暖端からの距離 cm	連 続 土 柱		不 連 続 土 柱	
	回収率 %	指 数	回収率 %	指 数
0 ~ 50	102.6	49.7	96.1	49.2
50 ~ 100	104.0	50.3	99.3	50.8
計		100.0		100.0
全回収率	103.3		99.7	

注 1) ともに各務原土壌, 充填密度 0.75 g/ml (固相率 32.0%), 当初含水比 24.88% (pF 4.0<, 気相率 49.3%)

2) 処理5日目の水分回収率%と全回収量に対する指数で示す。長さ5cmごとに実測した含水量を加算して回収率を求めた。

3) 不連続土柱は長さ1mの土柱の中央部で毛管連絡を切断。

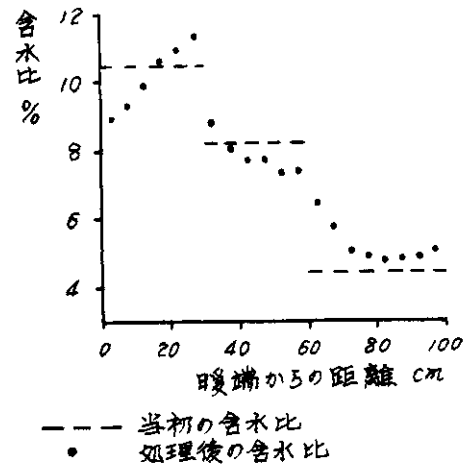


図6 不均一な水分層序をもつ連続土柱の、温度勾配下の水分分布(武豊土壌)

表5 暖冷両端部の含水比差と回収率差

土 壤	仮比重	当 初 含水比 Mo %	連続部分の 暖端よりの 距離 cm	連続部分両端の含水比差			連続部分両端の回収率差		
				5 日目	6 日目	7 日目	5 日目	6 日目	7 日目
武 豊 (連続)	1. 20	8. 23 10. 24	0 ~ 100 0 ~ 100	4. 14 1. 76			50 17		
	1. 50	4. 57 7. 20 14. 42	0 ~ 100 0 ~ 100 0 ~ 100	2. 17	1. 67 1. 20	2. 62	30	37 8	36
佐 屋 (連続)	1. 50	4. 72 11. 50	0 ~ 100 0 ~ 100		3. 10 0. 59			66 5	
武 豊 (不連続)	1. 50	10. 23	0 ~ 50 50 ~ 100	3. 29 2. 33			32 23		
		13. 42	0 ~ 50 50 ~ 100	3. 53 1. 35			26 10		

注 1) 差=冷端部%-暖端部%

2) 処理後土柱の長さ5 cmごとに実測した含水量を加算して回収率を求めた。

よれば、少水分のときの方が、多水分のときより、概して移動量が多い傾向が認められる。

4) 考察および問題点

水の蒸気態移動には、土壤空気全体の移動と水蒸気の拡散移動の2種がある。全体的移動は気圧、地温の急変、水の浸入、排水によって起こるが、これは水の蒸気態移動のごく一部にすぎず、蒸気態移動の主体は、拡散によるものである。水蒸気の拡散は蒸気圧勾配にしたがうが、水の蒸気圧は温度が上れば増大し、溶解塩類がふえれば減少し、また水分含量が多ければ増大するので、多孔質体中の水は、高温部から低温部へ、低塩類濃度部から高塩類濃度部へ向って行なわれる^{1,4)}。

実際の圃場では、上層が乾き、下層ほど多湿で、連続的に異なっている。土壤温度の垂直的勾配も、図4の例のように絶えず大きく変動している。日中消費された根群域の水分は、夜間には、ある程度まで補給されることがテンシオメーター等の観測によって認められている。比較的多水分時には、この補給の大部分は、水分張力勾配にしたがう下層からの毛管上昇に由来するであろうが、生育阻害水分点や難動毛管点をこえ、萎凋点ちかくまで脱水がすすんだ場合の補給は、夜間の土壤温度分布に起因する拡散移動の寄与が増すと思われる。湿潤気候下のわが国の畑地土壤において、この種の水分移動が果している役割についてはまだほとんど論じられていない。

本実験では水蒸気態移動に関与する諸要因の影響を予察的に検討した。要因の整理がたりず、測定誤差の多い例もあり、さらに理論面からの接近もところみななければならない等、むしろ今後にもちこすべき問題点が多かった。また、前章の実験と異なり、長い連続土柱を用い、圃場の実態にちかい比較的小さな温度勾配を与えた実験を限られた期間内に終えるために、必らずしも平衡状態に達しない時点(5~6日目)までしかできなかった。おそらく、少なくともこの2~3倍の日数をかけないと、安定した状態には達しないと考えられる。ただし、実際の圃場では、1日の周期で温度が変化しており、降雨、蒸発散などもあるので、事実上完全な水分平衡に達することはない。

土壤温度は、植生、肥効、土壤生成にとってきわめて重要である。とくに近年のように作期がはやめられ、被覆保温や土壤加温技術が普及してくると、土壤の熱的性質や熱収支に関する研究が必要である。本報の実験条件を設定するに当たり参考とした土壤温度の実態は、武豊における単年度、短期間の観測にすぎないが、その後も種々の観点から続行中のものである。

今回は、比較的長く連続した土柱を供試したので、2種の水分移動が相殺される過程で測定したことになる。むしろかかる実験条件は、より現地の状態にちかい、温度勾配下の移動水分量は、概して少水分のときに多い結果になった(表5)。

これは、水蒸気移動に関与する因子は、全孔隙量や孔隙分布ではなく、自由孔隙だという既往の報告^{3,4)}と一致している。

実際の土壌水分層序と温度勾配に模した状態（ただし密閉土柱）で、1例だけ夜間の温度勾配下（浅層＜深層）の水分分布をしらべた。その結果では、冷端側（少水分部）約0～15 cmの部分では、張力勾配に抗して、末端にちかいほど、わずかながら多くの水分が集積していた（図6）。この時の冷端側土壌の当初の水分率Mv 6.9%，気相率Av 34.3%で、水分張力はpF 4以上（pF 4～7の張力－水分関係未測）であった。

土壌水の移動を生ずるポテンシャルについては、その水理学的勾配と蒸気圧勾配の両者に注目しなければならないが、移動を生ずる主因が変換する水分含量については、今回の実験では例数が不充分でふれられなかった。わが国畑地の環境条件をふまえて、土壌の水分率、気相率、水分張力などとの変換点との対応関係を明らかにすることは、今後の課題である。

5. 土壌水の毛管移動の遅滞について－難動毛管点の対応張力値－

1) ねらい

圃場容水量から永久萎凋点までの水分を有効水分という。それに対して、実際の栽培条件下で圃場容水量（24時間容水量）から正常生育阻害水分点までの水分を成長有効水分とよぶ。実際の圃場の作物は、主根域の土壌が萎凋点に達するまで脱水されるはるか以前に、すでに外観上しおれはじめることが普通である。さらに、外観的にしおれ

なくても、ある程度以上体内水分が不足すれば、養分吸収に乱れを生じ、生育阻害をうけることが指摘されている。¹¹⁾ これは潜在的萎凋といえよう。

畑地における作物生産を保証するためには、このような水分不足による生育阻害をまねく前にかん水しなければならない。畑地におけるかん水点の高低に関与する要因としては、根の吸水域の広さ（深さ）、作物の水分に対する生育感応、土壌溶液濃度などがあるが、とくに少水分になるほど土壌水の毛管伝導度が低下するので、大きな要因になる。毛管移動が減退して、作物の水分消費、吸収を補償できなくなれば、体内水分は不足する。その意味で難動毛管点¹²⁾（毛管遅滞点）または毛管連絡切断含水量⁶⁾は、一般畑地かんがい栽培におけるかん水点の土壌学的根拠の1つとして有用な水分恒数である。それにもかかわらず、難動毛管点に関する研究は、わが国ではまだかならずしも多くない。以下、その測定法を検討するとともに、数種土壌について、対応する水分張力値を明らかにすることをねらいとして二、三の検討を行なったので報告する。

2) 実験方法および結果

(1) 各種土壌の難動毛管点の測定

供試土は、愛知県知多郡武豊町東海近畿農試畑作部N12圃場の洪積層に由来する赤黄色土、岐阜県各務原市の黒ボク土、愛知県丹羽郡岩倉町の沖積土、北海道枝幸郡浜頓別町道立天北農試第3圃場の砂礫質洪積堆積物に由来する褐色森林土、および同町ボンニチナイの泥岩質洪積堆積物に由来する疑似グライ土（いずれも畑地）である。その性質を表6に示した。実験は、吸水過程と脱

表6 供試土壌の性質

土 壌	深 さ cm	pH (H ₂ O)	CEC me/ 100g	粒 径 組 成 %				土 性	備 考
				粗 砂	細 砂	微 砂	粘 土		
武 豊	0～16	6.75	2.91	38.03	23.77	15.55	22.65	SCL LiC	吸水、脱水両過程の測定に供試
	20～50	4.80	7.92	29.05	29.66	12.99	29.30		
岩 倉	0～20	7.10	9.03	11.65	51.86	27.85	13.10	SL	
各 務 原	00～10	6.00	29.70	14.67	44.84	27.85	12.64	L	脱水過程での測定のみ供試
天北農試	0～15	7.00	33.00	9.57	29.60	43.70	17.13	CL	
	20～30	5.85	28.25	7.57	38.60	36.50	17.33	CL	
ボンニチナイ	0～10	5.55	23.75	1.80	32.67	37.63	27.90	LiC	
	20～30	5.05	17.00	1.65	24.50	44.45	29.40	LiC	

水過程とで行なった。

吸水過程での測定法は、直径8 cm、高さ50 cmの透明アクリル樹脂円筒の側面に径2.5 cmの穴を螺旋状に高さ5 cmごとにあけ、これにゴム栓をする。円筒下端をガーゼで覆い、上より供試土（風乾細土、2 mm篩別）を少量ずつ入れ、なるべく密に充填する。円筒の全長は、つないで計1 mとした。充填密度は、武豊耕土1.34、下層土1.30、各務原耕土0.74、岩倉耕土1.21 g（熱乾物）/m³になった。円筒下端を浅い水中にひたし、ガーゼ部より毛管吸水させて、湿潤先端が上昇する速さを、5 cmごとのゴム栓部を通過するまでの所要時間で記録するとともに、上昇高5 cmごとに、ゴム栓をはずして、湿潤先端部をなるべくうすく薬サ

ジで採土し、105℃で乾熱、秤量して、その含水比（対熱乾物重量百分率）を求めた。すべて20℃常温恒湿実験室で実験した。結果を表7～10に示した。

表7～10の各経過時間における最上部の数値は、それぞれの時点における湿潤先端の含水比を示す（厳密にはその直下2～5 mm程度の部位を採土している）。湿潤先端は、底部の自由水から連続した毛管水帯の最上部であって、かつ毛管水帯のうちで最小の含水比を示すことは表の実測値によっても明らかである。そして湿潤先端の上部とは、明らかにその水分状態について不連続である。換言すれば、湿潤先端含水比は毛管水が明らかな連続性を示す最少の含水比であると見なし得

表7 毛管上昇高と湿潤先端含水比の経時的変化（武豊耕土）

自由水面 からの高さ cm	経過時間 (分)											含水比 %
	25	90	180	250	480	930	1450	2250	7800	13100	19000	
60												13.7
55										14.1		16.1
50									14.5	16.5		18.5
45									17.4	16.2		19.5
40								14.8	19.7	17.5		21.2
35							14.6	18.2	20.4	18.9		21.7
30						15.1	19.6	21.4	22.5			23.0
25					15.9	20.9	20.7	22.8	24.0			24.6
20				15.9	20.9	22.1	23.2	25.2	25.5			27.3
15			18.9	22.5	23.3	24.7	25.6		27.9			29.1
10		18.6	23.8	24.4	25.2	26.2	26.9		28.4			29.5
5	19.1	23.0	25.1		26.0		27.9		31.4			31.7

表8 毛管上昇高と湿潤先端含水比の経時的変化（武豊下層土）

自由水面 からの高さ cm	経過時間 (分)															含水比 %
	12	39	85	132	350	550	750	1050	1450	1850	2650	3450	4700	5060		
70																15.9
65													16.1			21.4
60												16.0	21.7			23.7
55											17.0	21.0	24.1			24.1
50										18.1	22.9	23.8	25.1			25.8
45									18.6	24.1	24.7	25.2	26.2			26.5
40								20.7	23.4	24.5	25.4	26.8	27.5			27.7
35							22.0	27.1	25.3	26.9	26.7					29.5
30						22.0	26.1	28.3	27.0	28.0						29.5
25					22.8	26.2	28.2	29.6	28.8	29.4						30.4
20				21.7	26.4	27.6	28.6			29.8						32.8
15			28.0	28.5	29.1	28.9	29.4			30.0						32.3
10		26.4	31.3	29.9	29.1	29.0				39.2						33.6
5	22.4	30.7	29.6	30.4	29.5					34.6						33.9

表9 毛管上昇高と湿潤先端含水比の経時的变化(岩倉耕土)

自由水面 よりの高さ cm	経過時間(分)												含水比 %
	50	180	375	585	900	1250	1700	2200	2900	4100	6100	13000	19000
75													17.8
70													23.0
65												18.3	24.8
60												23.0	24.9
55											14.1	24.7	25.2
50										16.8	21.2	28.4	28.1
45									18.8	27.3	24.0	30.7	29.1
40								18.2	22.2	28.2	27.7	32.3	30.4
35							18.4	24.6	28.4	29.3	28.8	32.0	30.8
30						18.4	25.8	27.5	29.3	30.7		32.7	33.2
25					19.5	26.6	33.6	29.6	31.0	32.0		33.7	33.7
20				20.7	29.6	32.1	34.6	34.2		34.2		36.7	34.3
15			22.8	30.4	31.9	33.1	36.6			35.8		40.9	37.7
10		26.2	31.4	33.0	35.8	36.9				38.7		39.6	38.2
5	24.1	21.4	35.0	33.3	37.3	37.9				43.6		57.6	40.5

表10 毛管上昇高と湿潤先端含水比の経時的变化(各務原耕土)

自由水面 よりの高さ cm	経過時間(分)										含水比 %
	23	75	320	630	1100	2050	4000	7900	14500	19000	
50											41.0
45									51.6		43.1
40								47.2	60.6		64.3
35							50.0	62.0	71.6		72.3
30						51.6	62.3	63.6	74.6		71.6
25					50.0	67.6	70.1	80.4	86.0		83.6
20				51.2	72.4	76.5	79.2	85.0			85.5
15			52.0	75.5	81.4	70.6	88.6				90.2
10		50.1	80.1	87.0	93.0	94.8	97.7				90.5
5	64.5	79.4	85.1	90.6	93.5	93.8	97.0				95.5

る。湿潤先端だけを正確にとり出すことができず、その直下の湿潤部が混入しているので、はじめのうち毛管上昇高のまだ低い間の値は高めになっているが、毛管上昇高が高くなってからの値は、上昇高の高さおよび経過時間に関係なく、ほぼ同様の含水比を示すようになる。この毛管水帯の最上部の含水比がほぼ一定の値を示すようになったときの値をもって毛管連絡切断含水量(難動毛管点)とみなす⁶⁾。

脱水過程での測定法としては、椎名⁸⁾に準じ、100ml容採土円筒に充填した風乾細土を十分に毛管飽和させたのち、24時間重力排水した供試土柱の表面に多孔質磁板を密着させ、試料中の土壌水を吸収させつつ、20℃常温恒湿実験室内に放置

し、磁板を介して土壌水分を蒸発させ、経時的に秤量した。その結果を表11に示した。5日目でもまだ脱水量がゼロにはなっていないが、3～4日目以降は脱水量が急減し、定常的脱水状態になるようであった。このときの含水量は、土壌から磁板への水の移動が低減し、磁板表面からの蒸発損失が停滞しはじめる水分状態とみなすことができる。すなわち、吸水板を介しての脱水3日目の含水比をもって、脱水過程における難動毛管点(毛管連絡切断含水量)と見なした。

図7は、吸水、脱水両過程で測定した難動毛管点を4種の土壌について図示したものである。図7において、湿潤先端含水比は、原則として毛管水帯最上部の含水比実測値のうち最小の値をもっ

表11 吸水板による脱水過程から求めた難動毛管点

土 壤	当初の 含水比 %	吸水板による脱水後の含水比%				
		1日目	2日目	3日目	4日目	5日目
武豊表土	17.3	15.7	14.8	13.9	13.4	13.1
武豊下層土	31.2	21.7	18.1	15.9	15.4	14.8
各務原土	64.0	44.6	41.7	39.9	39.1	38.2
岩倉表土	23.6	21.7	20.0	18.9	17.4	—
天北農試表土	40.4	36.5	34.0	32.4	31.4	30.3
天北農試下層土	41.3	37.0	35.8	34.5	34.0	33.4
ポンニタチナイ表土	61.5	58.3	56.1	54.5	53.5	52.5
〃下層土	32.2	29.9	29.1	28.3	27.8	27.1

* 十分に毛管飽和させたのち、水から上げて金網上におき、24時間重力排水させたときの含水比。

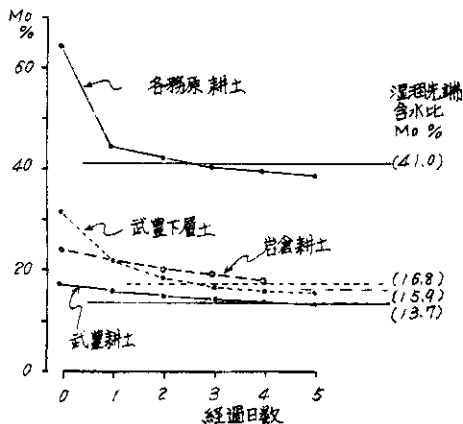


図7 吸水板を介しての蒸発にともなう供試土柱の重量変化

て代表させた(表7~10参照)。両法による難動毛管点は、比較的良好に近似した含水比を示すといえる。

(2) 難動毛管点と水分張力との関係

前項では、難動毛管点の含水量について検討してきた。ここでは、難動毛管点の含水量を水分張力に対応させた場合、果してどのくらいの張力に相当するか、土壌間差異はないかなどについて行なった実験結果を主に示す。

供試土の現地構造未攪乱定容試料による三相分布、容積重を表12、張力-水分率(容積百分率)曲線を図8に示した。測定法は、三相分布は実容積法⁵⁾、張力-水分率曲線は当研究室常用の方法¹⁰⁾によった。

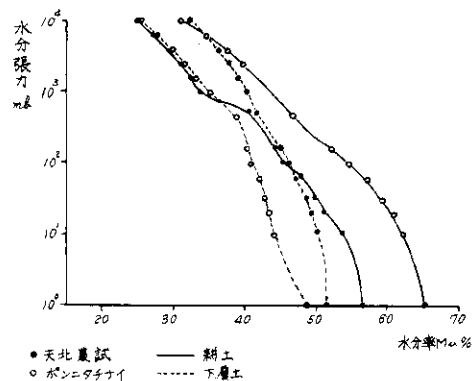


図8 供試土の張力—水分曲線

表12 供試土の三相分布

土 壤	容積重 g/ml	固 相 %	孔 隙 %	液 相* %	気 相* %
武 豊 耕 土	1.65	61.3	38.7	33.8	4.9
〃 下 層 土	1.50	55.7	44.3	44.3	0
岩 倉 耕 土	1.22	46.4	53.6	35.3	18.3
各 務 原 耕 土	0.75	30.7	69.3	58.0	11.3
天 北 農 試 耕 土	1.05	40.6	59.4	49.7	9.7
〃 下 層 土	1.21	46.1	53.9	48.6	5.3
ポ ニ タ チ ナ イ 耕 土	0.74	35.2	64.8	59.4	5.4
〃 下 層 土	1.15	44.3	55.7	42.8	12.9

* 水分張力32mbar時の値で示す。

難動毛管点の対応張力値を調べるため、前項の吸水、脱水両過程で測定した難動毛管点(含水比)を張力-含水比曲線上にプロットした結果を一覧表に整理すると表13のようになる。この結果によると、難動毛管点に対応する水分張力は土壤によって異なり、天北農試下層土だけがとくに低くて、pF 2.7 付近にあり、ついで同耕土がpF 3.0 であった。逆に最も高い張力に対応したのは武豊下層土のpF 3.9 であった。その他の供試土は、おおむねpF 3.4 内外の含水比に相当した。難動毛管点に対応する水分張力の高低と土壌水分特性その他の関連については、まだ普遍的な傾向を見出すまでには至っていない。

表 13 難動毛管点の対応張力値

供 試 土	含水比Mo %		対応張力 pF	
	湿 潤 先 端	難 動 毛 管 点	湿 潤 先 端	難 動 毛 管 点
武 豊 耕 土	13. 7	13. 9	3. 5	3. 4
〃 下層土	15. 9	15. 9	3. 9	3. 9
岩 倉 耕 土	16. 8	18. 9	3. 6	3. 5
各務原 耕 土	41. 0	39. 9	3. 6	3. 6
天 北 耕 土	—	32. 4	—	3. 0
〃 下層土	—	34. 5	—	2. 7
ボンニ 耕 土	—	54. 5	—	3. 4
〃 下層土	—	28. 3	—	3. 2

注 1) 湿潤先端含水比は原則として測定値のうち最小値をとった。

2) 難動毛管点は吸水板を介して脱水3日目の値をとる。

3) 考 察

湿潤先端部の水分は供試土柱の湿潤部分中の最低含水量をもち、かつ下部の自由水面と連続していることは疑う余地はない。この含水量と難動毛管点とを比較してみたが、図7に集約したように、吸水板を介しての蒸発にともなう供試土の脱水がほぼ微少定常化した時の含水比と湿潤先端含水比の測定値中の最低値とは、かなりよく一致したとみなされた。ここでの問題は、両法がそれぞれ吸水過程と脱水過程における測定であって、両過程間のヒステリシスループを全く検討していないことである。この点は今後検討しなければならない。

かくして、吸水板を介する脱水による毛管連絡切断含水量(難動毛管点)の測定は、一応実験的にも大きな矛盾はなく、蒸発表面に向う薄膜懸垂

水の移動が止む限界含水比(アゾブルーマバのいう毛管連絡切断含水量⁶⁾)は、自由水面をもった風乾土柱中の湿潤先端の含水比に近似することが示された。

脱水過程(吸水板法の3日目の水分で代表させる)で測った難動毛管点、吸水過程で測った湿潤先端水分、およびそれらの対応張力値は、表13に要約されているように、土壤によって異なり、張力0.5~8.0 bar (pF 2.7~3.9)の範囲にあった。供試した8種の土壤では、2.5 bar (pF 3.4)前後のものが多かった。従来いわれていた1 bar (pF 3.0⁹⁾)よりは若干高張力側にあった。この点については、なお測定例を増して検討したい。難動毛管点の対応張力値の高低は、土壤中の薄膜懸垂水の連続性と運動性の大小にかかっていると考えられるが、それは水分含量や土粒子比表面と無関係ではない。比表面はかならずしも粘土の量だけでなく、粘土鉱物の種類間で大差があることがわかっており、比表面の大きい土壤ほど高張力時の含水比が多い。

正常な生育を保つためのかん水点は、根群域の広さ、土壤塩類濃度、作物の水分感応なども関与する。したがって、単に耕土の水分がある張力になったならば、どの作物でも、どの土壤でも、常に生育阻害を生ずるとは限らない。畑地における生育阻害水分点は、作物、作型、時期、土壤などによって、張力で表わせば、0.1 bar 前後から1 bar 以上まで大きな違いがある。

本報の実験から、難動毛管点が1.6~4.0 bar (pF 3.2~3.6)の高張力側に対応する例が多いようである。したがって、根の吸水点への水分移動の限界水分としての難動毛管点が、かんがい栽培におけるかん水点-かん水適期の土壌水分状態と対応できるのは、比較的深い根群、すなわち広い吸水域をもつ作物の場合であろう。したがって、一般にそ菜類より普通作物、単年生草本作物より永年樹のかん水適期の判定に役立つと考えられる。

6 土面の状態と土壤通気性および浸入水量

1) ね ら い

腐植にとほしい細粒質の鉱質土壤の畑地では、雨滴や水滴の衝撃と土面蒸発の反復にともなって生ずるクラスト(土膜)は、緻密堅硬なため、作物の出芽を阻害し、初期生育を不揃いにするだけでなく、雨水やかんがい水の浸入を減少せしめ、

表面流去を増加せしめる。その阻害程度は、クラック（亀裂）の密度、単位土粒子の分散性、クラストの構造と厚さなどに左右されるが、通常、粘土含量が多く、腐植の少ない土壤中、土面被覆度が少ないほど、顕著にクラストが生成する。クラストそのものがうすく、もろいため、クラスト部分の物理的性状の測定には困難がともなう。本報では、土面処理または土性を異にする土壤の40 g/m²加圧下の空気透過係数を、試作した現場通気性測定装置ではかり、クラストの物理性を総合的に判定する一手段とした。

2) 現場通気性測定装置および操作法¹³⁾

用いた装置は、EVANS³⁾の考案したものに準じた。その概要図を図9に示した。タンク部分は、約70ℓのタンク、マンメーター、温度計、タイヤポンプからなり、送気管部分は、土壤中に空気を送りこむアクリル樹脂製送気管、これを支える三脚、およびリングからなる。送気管は自由に昇降させることができる。リングには、高さ4 cm、直径11.2 cmのステンレス製400 mℓ容採土管を用いた。

測定法は、まず被検土の土面を水平にならし、リングを深さ5 mmだけ押しこむ。送気管の下端にパテを少量まきつけ、土面によく接着せしめる。その後、リング内の土面をうすく被覆するため、固形パラフィン¹⁴⁾を溶かし、90～100℃の状態¹⁵⁾でリング内に静かに注ぎこむ。このときパラフィンが送気管孔をふさがないように、パテのつけかた、接着具合などを加減する。パラフィンが冷えて固まったならば、送気管とタンクを耐圧ゴム管で接続する。このとき、あらかじめ送気管に長めの耐圧ゴム管を接続しておくと、操作の間の送気管のふれを防止することができる。その後、付属のタイヤポンプで、タンク内の圧を水柱約40 cmに高め、一旦静止させる。ついで、送気管につながるバルブを手早く開き、一定時間後バルブを閉じる。この間のタンク内圧の減少値を読み取り、次式によって透過係数（Intrinsic permeability）を算出する。透過係数はL²の次元をもつ。

$$K = \frac{2.30 \mu V}{AP_a t} \log \frac{y_0}{y_1} \dots \dots \dots (1)$$

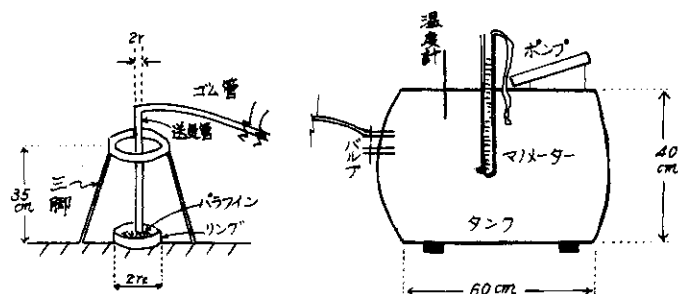


図9 現地通気性測定装置の模式図
(EVANSらの原図を一部改変)

ここで、

K : 透過係数 (単位ダルシー) *

μ : 空気の粘性 (20℃で 180.9×10^{-4} センチ p)

温度補正には次式を用う。

$$\mu_t = \mu_{20^\circ\text{C}} - 4.83 \times 10^{-7} (23 - t) P$$

V : タンクの容積、cm³ (供試したものは 69,200 cm³)

r_1 : 送気管の内径、半径 (用いたものは $r_1 = 0.19$ cm)

$V : 4 r_1$

P_a : 大気圧、1 気圧

t : 測定時間 (秒)

y_0 : 測定開始時のタンク内圧 (水柱高 cm)

y_1 : 測定開始から t 秒のタンク内圧 (水柱高 1 cm)

(1)式において、 μ 、 V 、 A 、 P_a は測定時の条件によって定まる定数である。したがって、空気透過係数 K は、 t とマンメーターの読みとから求めることができる。

* 1 ダルシー = 9.8697×10^{-9} ポアズ・センチメートル 毎秒/ダイン・毎平方センチメートル

1 ポアズ (p) = 1 g/cm・秒

3) 現場通気性測定法の検討¹³⁾

(1)式において、測定時間(t 秒)を一定にすれば、

$$K = a \cdot \log \frac{y_0}{y_1} \dots\dots\dots (2)$$

ここで a : 定数

となる。したがって、 y_0 と y_1 をはかれば K が得られる。(2)式は、対数の一次関数であるから、直線回帰を示すはずである。本装置を用いて、この関係をたしかめるため、表14に示した土壤条件で、常温恒湿実験室(室温 20°C 、湿度約50%)内で測定した。その結果を図10に示した。また、当初タンク内圧 y_0 を一定にして、時間 t を任意にかえたときの t と y_0/y_1 の関係を図11に示した。これらの結果は、いずれも直線回帰を示し、空気透過係数 K を求める場合、初期タンク内圧および時間を任意に設定してよい。

表14 測定条件

	A	B
仮比重	1.48	1.40
固相(%)	55.2	52.0
液相(%)	14.5	13.2
気相(%)	30.3	34.8

A : 図10の条件

B : 図11の条件

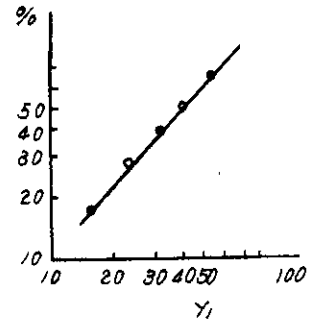


図10 10秒間における水柱圧(y_0 と y_1)の関係

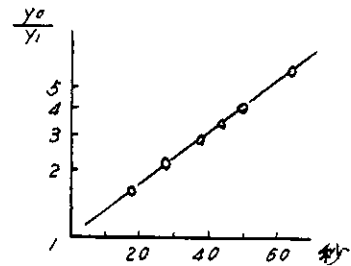


図11 時間と y_0/y_1 との関係

4) 結果と考察

構内の畑で、処理を異にする区をつくり、無作付下で行なった。供試圃場の土壌の粘土、有機物含量、土性などを表15、処理内容を表16に示した。処理は8月18日に実施し、9月16日に測定した。1~4区については、測定に当たって、区の一部の土面を攪乱して表面の構造をこわした個所でも測定した。処理による表層土の三相分布の変化と、各区の土壌面において測定した透過係数を表17に示した。表18は、ほぼ同様の実験を反復、確認した結果である。通気を規制する要因である気相率は、改良剤散布区が最も高く、次いで下層土客入区、改良剤下層土客入併用区、無処理区となり、下層土露出区および鎮圧区はきわめて少なくなっている。透過係数は、気相の少ない下層土露出区および鎮圧区では、ほとんど通気が行なわれず、次いで無処理区が小さい値を示した。その他

の処理間の差は比較的少なかった。観察によれば、クラスト生成が顕著であった無処理区では、とくに土面付近は脱水がすすみ、構造も緻密になっていた。したがって、土面をかく攪乱してはかった透過係数は、各区とも大きくなり、とくに無処理区では7倍以上に達した。すなわち、中耕、耕耘などによって表層を攪乱することは、通気性をよくする上できわめて有効である。改良剤処理区では、土面攪乱の影響がほとんどなく、ともに大きな透過係数を示した。これは、土壤改良剤散布が粒団形成をうながし、水滴の衝撃等によって分散することなく、クラストの生成がほとんどなかったためである。なお気相率は、土面をふくむ10cm(表17)、1.6cm(表18)の深さまでを対象としてはかったが、クラストをふくむ試料の方がクラストをこわした試料より固相率が大きいという数値は確認できなかった。

表15 供試圃場の土壌の粒径組成

層位	深さ cm	有機態炭素 %	粒 径 組 成 %				土 性	山中式土壌硬度計 示度 mm
			粗 砂	細 砂	微 砂	粘 土		
Ap	0 ~ 25	0.54	32.8	28.7	12.2	26.0	SC	9
B	25 ~ 32	0.32	19.2	18.0	13.9	48.9	HC	22
C	32 ~ 60	0.17	18.1	19.0	11.2	49.9	HC	23

武豊W9圃場

表16 処 理 方 法

処 理	処 理 の 内 容
1. 無 処 理 区	耕起整地後スプリンクラーで30mm散水し、放置してクラストを生成させた。
2. DH・2 散 布 区	合成陽荷電土壌改良剤DH・2（ポリアクリルアミドポリマー濃度20%）100倍液を散布（1kg/a）したのち、30mm散水した。
3. 下 層 土 客 入 区	下層土（深さ50~100cm、土性HC）を厚さ3cm程度客入し表層10cmと攪乱、混和したのち、30mm散水した。
4. 改良剤、下層土客入併用区	2区と3区との併用
5. 鎮 圧 区	耕起整地後自重1.9tのトラクターで踏圧した。30mm散水した。
6. 下 層 土 露 出	1区の耕土（厚さ25cmまで）を削剥し、重粘な下層土を露出させた。

処理は1970年8月18日に行ない、9月16日に測定した。

表17 土面処理を異にしたときの透過係数

処 理 区		透過係数K (20℃) ダルシー				測定時の深さ0~10cmの三相分布など			
		A	B	C	平均	固相%	液相%	気相%	仮比重
無 処 理 {	無 攪 乱	17.3	16.1	17.5	17.0	43.2	22.6	34.2	1.21
	土面攪乱	165.8	115.4	103.3	128.2	—	—	—	—
改良剤散布 {	無 攪 乱	77.3	136.5	119.2	111.0	37.4	19.6	43.2	1.06
	土面攪乱	109.6	166.6	115.5	130.6	—	—	—	—
下層土客入 {	無 攪 乱	49.7	73.0	72.5	65.1	41.1	21.2	37.6	1.17
	土面攪乱	91.7	93.4	123.2	102.8	—	—	—	—
改 良 剤、 下層土客入 併 用	無 攪 乱	73.7	87.6	42.8	68.0	42.9	19.2	37.9	1.20
	土面攪乱	125.1	187.1	133.3	148.7	—	—	—	—
鎮 圧	無 攪 乱	tr	tr	tr	tr	64.7	27.3	8.0	1.69
下層土露出	無 攪 乱	tr	tr	tr	tr	60.0*	37.3*	2.7*	1.60*

注 1) 透過係数はA, B, C 3カ所について各3反復の平均

2) * 深さ25~35cmについて測定

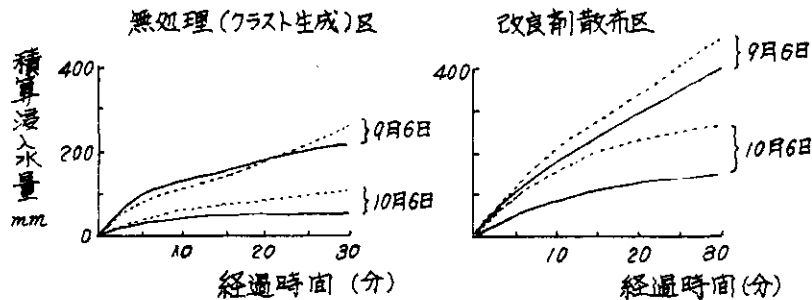
つぎに、クラストの有無が水の浸入に及ぼす影響について、同様の土壌で若干の測定を行なった。底面積100m²、高さ4cmの鉄製シリンダーを深さ1cmだけ土面から打ちこみ、水深約2mmを保つように補水しつつ、浸入水量を測定した。供試圃場は、合成土壌改良剤を散布してクラストがなる

べく生じないようにした構内畑と、無処理で自然にクラストを生ぜしめた同じ畑である。エンジン播種直後に、改良剤原液（ポリアクリルアミド系ポリマー濃度30%）2kg/aを125倍に希釈して散液施用した。播種後11日目と41日目にはかった積算浸入水量（2連）を図12に示した。無処理

表 18 クラスト生成と透過係数

処 理	水分率*	気相率*	山中式硬度計**		透過係数 K ダルシー(20°C)
			示度	mm	
クラスト生成区 {	無攪乱	2.5	54.5	10.0	8.8
	土面攪乱	4.9	51.2	6.6	69.2
改良剤散布区 {	無攪乱	3.0	55.4	8.7	37.4
	土面攪乱	5.0	52.8	5.7	63.1

- 注 1) * 深さ0~1.6 cmの部分をとって測定
 2) ** 土面から垂直方向にコーンをさしたときの示度
 3) クラスト生成区は武豊土壌の表層0~10 cmをよく碎土し、5mm以下に篩別し、均一な層を作り、この上に如露で30mm散水し、自然放置した。土面攪乱は測定前に土面付近(約0~3 cm)をくだいたもの。改良剤散布は表16に準じた。



9月6日: 処理後11日目
 10月6日: 処理後41日目

図 12 クラストの有無と浸入水量

区はクラストが顕著に生成していたが、2回の測定とも、明らかに浸入水量が低下しており、水の浸入に対するクラストの影響がうかがわれた。なお、本実験では、改良剤を耕土全層に混和施用したのではなく、その一部を稀釈液として土面に散布施用したので、土面のクラスト生成は抑制されたが、土面下の耕土層全体の土壌を粒固化させるほどの大きな影響は見られない。したがって、前述の通気性測定結果と同様に、改良剤散布の有無による浸入水量の差違も、クラストの生成程度が主として関与していると考えられる。

土壌の乾燥にともなうできるクラストは、うすくてかつ亀裂が多いなど、定量的な取扱いが困難な対象である。本報では、その物理的、機能的性格を通気性と水の浸入性の面から、総合的に判定するねらいで取り上げた。通気性や浸入性については、深耕ないし土層改良を施行した畑における土壌物理性の推移を追跡し、その効果を確認する手段の1つとして、上記と平行して調べ、別に

報告した。^{13,14)} それらの結果をふくめて考えると、ここで用いた現場通気性測定装置では、踏圧後の土層や重粘性の武豊下層土では透過係数はほとんどはかれなかった。顕著なクラストの有無は透過係数にも反映したが、下層土客入の影響などについては、明らかな差を示さず、また土面から深さ1.5 cmぐらいまでのごく表層部の気相率、孔隙率と透過係数との関係も明らかな傾向を示さなかった。したがって、クラスト部分の物理的性質を数量化し、その農業的意義づけをするためには、土面レプリカの表面粗度、接写法、固化標本の鏡検などの手法を併用しなければならない。¹³⁾

7. 摘 要

夏季干天時や干ばつ時など、比較的土壌水分が少ないときの水分移動形態としては、毛管移動とともに蒸気態移動が考えられる。本報告では、温度勾配下の土壌水分分布と移動、毛管移動による水分補給の限界点としての難動毛管点とそれに対

応する水分張力、および乾燥時に生成して水の浸入を阻害するクラストの通気性と水の浸入について、若干の検討を行なった。それらの結果は、以下のように要約される。

- 1) 土柱間に温度勾配があれば、土壤水は高温部から低温部へ向って移動する。温度差が大きければ、土柱が連続して毛管移動があっても、それを上回る蒸気態移動が行なわれる。温度勾配下の水分移動には、自由孔隙すなわち気相率が関与するので、概して少水分（ある範囲まで）のときに、移動水分量が多い傾向があった。夜間の下層からの補給による耕土層の水分回復には、夜間土壤温度分布が表層<下層になるために、毛管移動のほかに、蒸気態移動が関与すると考えられる。このような場合の蒸気態移動については、本報では単に現象的にとらえただけで、その寄与程度と土壤条件などとの関係については、今後にのこされた。
- 2) 8種の土壤の難動毛管点を吸水過程（湿潤先端水分）と脱水過程（蒸発停滞水分）の2方法で測定し、張力-水分曲線上で対応張力値を求めた。その結果は、土壤によってやや異なり、0.5~8.0bar (pF 2.7~3.9)の範囲になり、2.5 bar (pF 3.4)内外のものが多かった。
- 3) EVANSらに準じて現場通気性測定装置を試作し、踏圧、散水、下層土混入、および合成土壤改良剤散布など、クラストの生成程度と表層の容積重を異にする処理を加えた区をつくり（場内）、水圧40 cm以下での現場通気性を測定した。その結果、気相の少ない踏圧区や表土剝削区ではほとんど通気せず、ついで散水区（透過係数17ダルシー）で、これは表層攪乱直後の約1/7、改良剤区の1/6であった。土壤改良剤の土面散布によって、無処理でクラストの生じた畑にくらべ、長い期間、浸入水量も高い値を保った。

- 3) JONES, H. E. and H. KOHNKE (1952): The influence of soil moisture tension on vapor movement of soil water. Soil Sci. Amer. Proc. 16. 245~248
- 4) KOHNKE, H. (1968): Soil Physics. McGraw-Hill. 62~65
- 5) 美園 繁 (1958): 実容積法による土壤物理性の測定. 土肥誌, 29. 67~70
- 6) RODE, A. A. (1955): 土壤と水. 山崎ら訳, 東京大学出版会, 1963
- 7) RODE, A. A. (1965): The Theory of Soil Moisture. vol. 1. Moisture. I P S T (Transl. 1969). 397~408
- 8) 椎名乾治 (1963): 蒸発による畑地水分の減少機構に関する研究. 農土試報告1. 83~156
- 9) 椎名乾治・小管孝利 (1967): 土壤の生産力的水分定数に関する研究. 畑地かんがい研究集録Ⅹ. 1~4
- 10) 東海近畿農試畑作部 (1969): 土壤の物理性の測定法 (第2版)
- 11) 東海近畿農試畑作部土肥2研 (1968): 一時萎凋が養, 水分吸収におよぼす影響. 昭和42年度試験研究成績書. 22~30
- 12) WIDTSOE, J. A. and W. W. McAUGHLIN (1912): The movement of water in irrigated soils. Utah Agric. Coll. Exp. Sta. Bull. 115
- 13) 安田 環・大崎玄佐雄 (1972): 土壤空気に関する研究 第2報 武豊土壤の通気性について. 東海近畿農試研報. 24. 94~104
- 14) 湯村義男・石原 暁 (1971): 心土破碎および深耕が土壤水の動態と作物の生育に及ぼす影響. 畑の排水に関する土壤学的研究(3). 東海近畿農試研報. 22. 84~97

引用文献

- 1) BAVER, L. D. (1948): Soil Physics. 土壤物理学 (野口・福田訳, 1955) 249~252
- 2) EVANS, D. D. and DON KIRKHAM (1949): Measurement of the air permeability of soil in situ. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14. 65~73