

## 砂質土壌の土壌水分特性曲線と その温度依存性について

矢野友久\*・井上光弘\*\*・小谷佳人\*

### On the Soil Moisture Characteristic Curve of Sandy Soil and Its Temperature Dependence

Tomohisa YANO,\* Mitsuhiro INOUE\*\* and Yoshihito KODANI\*

#### Summary

The soil moisture characteristic curves of sandy soils were determined by using the soil column method and their temperature dependence was examined. An analytical expression fitting the observed data is:  $S_e = 1 / \{1 + (\alpha h)^m\}^n$  where  $S_e$  is the effective saturation,  $h$  is the matric suction head, and  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  are the parameters to be determined experimentally. The temperature coefficient of matric suction, which was calculated from the experimentally determined expression, greatly exceeded the values expected from the classical surface tension-temperature relationship. Larger values of temperature coefficient were obtained in decomposed granite in comparison to dune sand. The trapped air in the unsaturated soil system was considered to have resulted in the discrepancy between the observed and calculated temperature coefficients.

#### ま え が き

不飽和土壌中に保持される水分量はマトリックサクシジョンの関数であり、この両者の関係を曲線で表したものは土壌水分特性曲線と呼ばれる。これは、不飽和透水係数、土壌水分拡散係数とともに、土壌中の水分の挙動を支配する重要な土壌物理定数であ

る。

土壌水分特性曲線は色々な方法によって実験的に得られるが、土壌水分量とマトリックサクシジョンとの関係を理論的に表すことが困難なために、種々の実験式が提案され、使用されてきた。

土壌水分特性曲線が温度によって影響を受けることは古くから知られているが、それを取り扱った文

\* 砂丘利用研究施設水文かんがい部門

\*\* 鳥取大学農学部農業水利学研究室

\* Division of Hydrology and Irrigation, Sand Dune Research Institute

\*\* Laboratory of Irrigation and Drainage Engineering, Tottori University

献は、乾燥地を有する諸国においても比較的少ない。温度変化が著しい乾燥地のような条件下の土壤水分の挙動を取り扱う場合、土壤水分特性曲線の温度依存性を考慮しなければならないかどうかについて、あらかじめ検討しておく必要がある。

ここでは、砂質土壤の土壤水分特性曲線を土柱法によって決定するとともに、その温度依存性を明らかにすることを目的として、実験的研究を行った。

### 実験方法

土壤水分特性曲線は、脱水過程におけるものを対象とし、砂丘砂とマサ土に対して、土柱法によって求めることとした。土柱法による土壤水分特性曲線の決定は次のようにして行った。まず、内径5cm、厚さ2cmまたは5cmの2種類のアクリル製リングを積み重ね、ビニールテープによって土壤カラムをつくり、土壤を充填する。充填に際しては、場所による乾燥密度の違いを避けるために、カラムの上部から土壤を注ぎ込む方法を用いた。次に、カラムの底部から水を供給することによって、土壤を水で飽和する。土壤カラムの底部に地下水面を設定した条件のもとで、土壤水の重力排水を行う。土壤水分が平衡に達するまでに十分に時間をかけた後、リングを取り出し、炉乾法によって土壤水分量を求める。求められた土壤水分量を、地下水面から各リングの中央までの高さに対してプロットする。

土壤カラムの長さは、砂丘砂に対して65cm、マサ土に対して125cmとした。砂丘砂については、底部から高さ40cmまで厚さ2cmのリングを用い、残りを厚さ5cmのリングとし、1回の実験に3本のカラムを用いた。マサ土については、底部から高さ90cmまで厚さ2cmのリングを用い、残りを厚さ5cmのリングとし、1回の実験に2本のカラムを用いた。

土壤水分特性曲線の温度依存性を明らかにするために、実験は、鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設のアリドロン施設内のグロウスキャビネット(室面積1.2×1.2m、高さ1.5m)を用いて行った。実験に用いた温度は10、20、30、40°Cの4種類である。実験中の温度は、深さ10cm間隔に熱電対を埋め込んだ土壤カラム内の温度測定によって確認した。土壤温度と設定温度の差は、いずれの実験においても、

表一 供試土壤の粒径組成

粒 径 (mm)	組 成 割 合 (%)		区 分
	砂丘砂	マサ土	
>2.0	0	0	礫
2.0-0.2	91.9	77.4	粗 砂
0.2-0.02	4.6	12.1	細 砂
0.02-0.002	0.2	3.8	シルト
<0.002	3.3	6.7	粘 土

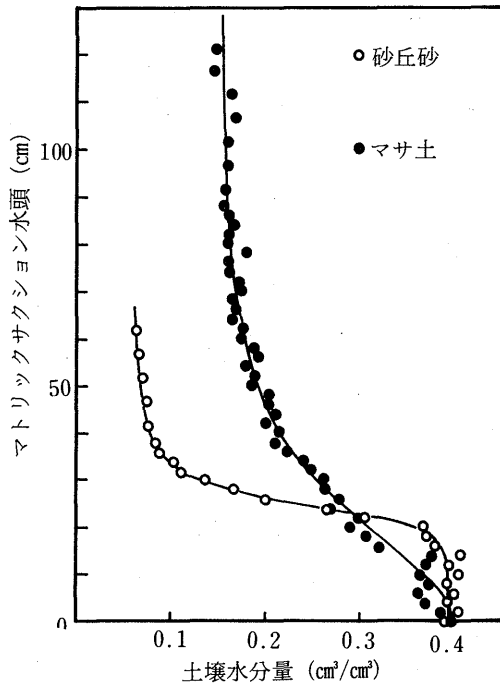
絶対値で0.2°C以内であった。実験に際して、カラムへの給水開始とともに、グロウスキャビネットの温度制御を開始し、2日程度の時間をおいて、脱水を開始した。さらに、2日程度の時間をおいて、土壤水分量の測定を行った。

用いた砂丘砂とマサ土の粒径分析の結果は表一のとおりである<sup>9)</sup>。真比重は砂丘砂2.67、マサ土2.60であり、間隙率は、それぞれ、41.6%、49.3%であった<sup>9)</sup>。土壤水分特性曲線の決定に際して得られた乾燥密度は、砂丘砂(試料数450個)に対して1.55±0.06g/cm<sup>3</sup>、マサ土(試料数416個)に対して1.34±0.05g/cm<sup>3</sup>であった。

### 実験結果と考察

#### 1. 砂丘砂とマサ土の土壤水分特性曲線

温度20°Cに対して得られた土壤水分特性曲線を図一に示す。ここで、土壤水分量は体積含水率(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)で表し、マトリックサクシオンは水頭(cm)で表した。サクシオン水頭がゼロに相当する土壤水分量は、砂丘砂については、間隙率に近い値が得られているが、マサ土では、間隙率より10%程度小さい値を示しており、空気がかなり封入されているのではないかと思われる。砂丘砂もマサ土も同じ砂質土壤であるが、細砂以下の微細粒子の含有率が15%程度異なっているために、土壤水分特性曲線の形もかなり異なっている。すなわち、マサ土の土壤水分量は、水頭25cm以下の低サクシオン部を除いて、砂丘砂の水分量より大きい。この低サクシオン部についても、脱気水を用いて土壤を飽和させる方法を用いれば、砂丘砂よりも大きな水分量を得ることは十分に考えられる。また、砂丘砂は、マサ土に比べて大



図一 1 砂丘砂とマサ土の土壌水分特性曲線  
(温度20°C)

間隙がより多いために、比較的に小さなサクシヨン変化でほとんどの間隙水が排除され、少量の土壌水分が残存するにすぎない。しかし、大間隙の土壌水分が排除された後のサクシヨン増大に伴う土壌水分量の減少は、両者ともに非常に小さく、砂質土壌の特長をよく表している。

土壌水分特性曲線を表すために、次に示す簡単な形の実験式がよく用いられる<sup>5)</sup>。

$$h = a\theta^{-b} \quad (1)$$

ここで、 $h$  はマトリックサクシヨン水頭、 $\theta$  は土壌水分量、 $a$ 、 $b$  は定数である。しかしながら、上式は、図一1の砂丘砂の土壌水分特性曲線のように、S字形を呈する曲線には適合度がよくない。(1)式の形の実験式を強いて用いようとすれば、水分量あるいはマトリックサクシヨンの限られた一部の範囲に適用するしか方法がない。

(1)式に類似しているが、土壌水分量( $\theta$ )の代わりに有効飽和度( $S_e$ )を用いた実験式もよく用いられる<sup>1)</sup>。

$$S_e = \left(\frac{h_e}{h}\right)^\lambda \quad (2-1)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2-2)$$

ここで、 $h_e$ は空気侵入値をサクシヨン水頭で表したものの、 $\lambda$ は定数、 $\theta_s$ は飽和水分量、 $\theta_r$ は残留水分量である。空気侵入値とは、水で飽和された土壌に負圧を加えるとき、最大の間隙内の水が排水し始める限界値である。残留水分とは、土壌中の孤立間隙内に含まれる水分であり、毛管流動に関与しない水分と考えられる。土壌水分量を飽和水分量で除したもの( $\theta/\theta_s$ )は飽和度であるので、 $S_e$ は有効飽和度と呼ばれる。(2-1)式は $h \geq h_e$ に対して成り立つものであり、 $h \leq h_e$ に対しては $S_e = 1$ 、すなわち、 $\theta = \theta_s$ とされる。(2-1)式は空気侵入値付近を除いて、図一1のような形の土壌水分特性曲線についてもよく適合するとされている<sup>1)</sup>。

(2-1)式を変形した次の形の式は、砂丘砂の土壌水分特性のように、S字形をした曲線のすべての範囲に適用できるとして、最近提案された<sup>12)</sup>。

$$S_e = \left\{ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right\}^m \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$ は土壌の種類に応じて異なった値をとる定数である。上式は非線型なので、定数を簡単には決定できない難点があるが、非線型最適化の技法を用いることによって、実験式を決定できる。

(3)式で $m=1$ とした式<sup>13)</sup>あるいは $m=1$ とし、 $h$ の代わりに $\ln h$ を用いた式<sup>9)</sup>なども類似した実験式として用いられる。また、相馬<sup>11)</sup>が提案した式は残留水分量( $\theta_r$ )をゼロとした場合の(3)式に相当する。

ここでは、(3)式の形の実験式を砂丘砂およびマサ土の土壌水分特性曲線に適用することを試みてみた。図一1に示した砂丘砂の土壌水分特性曲線は、マトリックサクシヨンの範囲が狭いために、別に得られたデータ<sup>7)</sup>を用いることとした。(3)式において、飽和水分量( $\theta_s$ )、残留水分量( $\theta_r$ )、定数 $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$ の5個のパラメータを非線型最小二乗法によって決定することとし、最適値の決定は最大傾斜法<sup>8)</sup>によって行った。このようにして得られた結果を図一2に示す。図一2に示す実験値は土柱法、減圧型吸引法、テンシオメータ法、遠心法によって得られた値

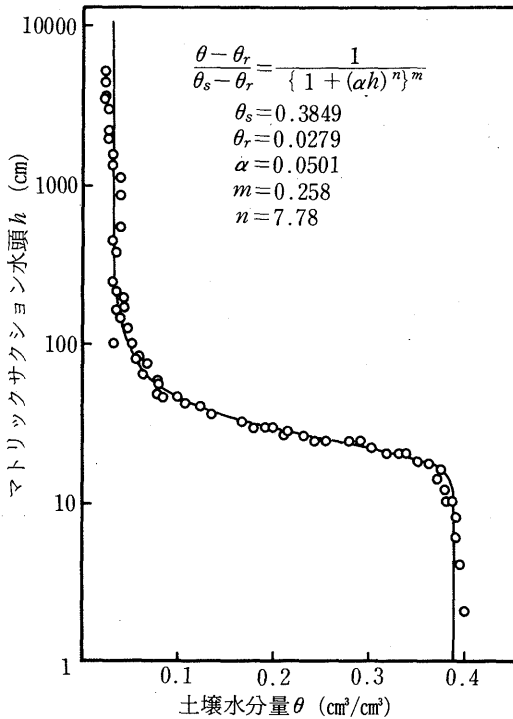


図-2 砂丘砂の土壤水分特性曲線に対する実験式のあてはめ（井上らのデータによる）

をまとめてプロットしたものである。計算によって得られた値の実験値に対する適合度は非常によく、実験値の総数62個に対し、残差平方和は0.005であった。マサ土に対する実験式のあてはめの結果は図-1内に併記した。なお、比較のために、砂丘砂の場合のあてはめの結果も併記した。あてはめに際して、飽和水分量 ( $\theta_s$ ) は未知の値とせず、サクシオン値がゼロの水分量を用いた。決定した各パラメータの最適値は、マサ土に対して、 $\theta_r=0.154$ ,  $\alpha=0.0193$ ,  $m=2.82$ ,  $n=1.78$ であった。残差平方和は、データ数52に対して、0.005であった。一方、砂丘砂に対するパラメータの最適値は、 $\theta_r=0.0645$ ,  $\alpha=0.0440$ ,  $m=0.511$ ,  $n=10.7$ であり、残差平方和は、データ数25に対して、0.001であった。このように、砂丘砂およびマサ土の両方に対し、(3)式の形の実験式を適用できることが判明したので、この後の解析についても、この形の実験式を用いること

とした。

## 2. 土壤水分特性曲線の温度依存性

土壤水分特性曲線の温度依存性を明らかにする実験は、前記のように、温度10, 20, 30, 40°Cについて行ったが、ここでは、温度10°Cおよび40°Cの結果のみを図-3および図-4に示す。温度20°Cおよび30°Cの結果は、図の繁雑さを避けるために、プロットを行わなかった。温度20°Cの結果はすでに図-1に示している。20°Cと30°Cの実験データは10°Cと40°Cの実験データの間に入った。図-3および図-4にみられるように、温度の土壤水分特性曲線に及ぼす影響が明らかに認められ、同一のサクシオン値に対して、高温になるほど土壤水分量が小さくなることを示している。温度依存性は砂丘砂よりもマサ土に大きいことが認められ、この傾向は、最近、砂と砂質ロームについて得られた結果<sup>4)</sup>と一致している。

土壤水分特性曲線が温度依存性を有する理由の一つとして、表面張力の温度依存性があげられる。よく知られた表面張力の式は次のとおりである。

$$p = \frac{2\sigma}{r} \quad (4)$$

ここで、 $p$  は考える点の水の圧力ポテンシャル、 $\sigma$  は表面張力、 $r$  は気-水界面の平均曲率半径である。圧力ポテンシャル ( $p$ ) はマトリックサクシオン水頭 ( $h$ ) に水の単位体積重量 ( $\rho g$ , ここで、 $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力の加速度) を乗じて、負の符号を付けたものに相当する。水の表面張力 ( $\sigma$ ) は温度10°C, 40°Cに対して、それぞれ、74.20 g/sec<sup>2</sup> および 69.55 g/sec<sup>2</sup> である。したがって、同一の曲率半径 ( $r$ ) に対して、温度が低いほど圧力ポテンシャルが小さくなる。言葉を換えると、同一の土壤水分量 ( $\theta$ ) に対して、温度が低いほどマトリックサクシオンが大きくなり、これは、図-3および図-4に認められる傾向と一致する。しかしながら、図に認められる温度依存性が表面張力の温度依存性のみによって説明がつくかどうかの検討が必要であり、以下にこれを検討することとした。

図-3および図-4に示す実験値はかなりのバラツキを示しており、中には大きな実験誤差を含む実験値もあるように思われるので、ここでは、前に述べた方法によって実験式のあてはめを行い、その結

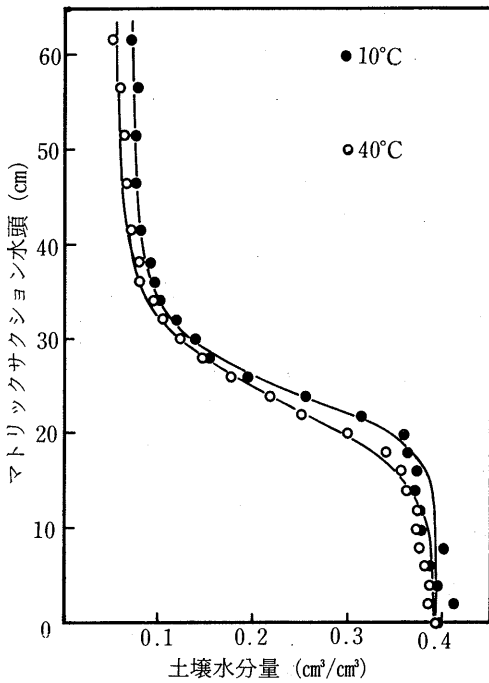


図-3 砂丘砂の土壌水分特性曲線

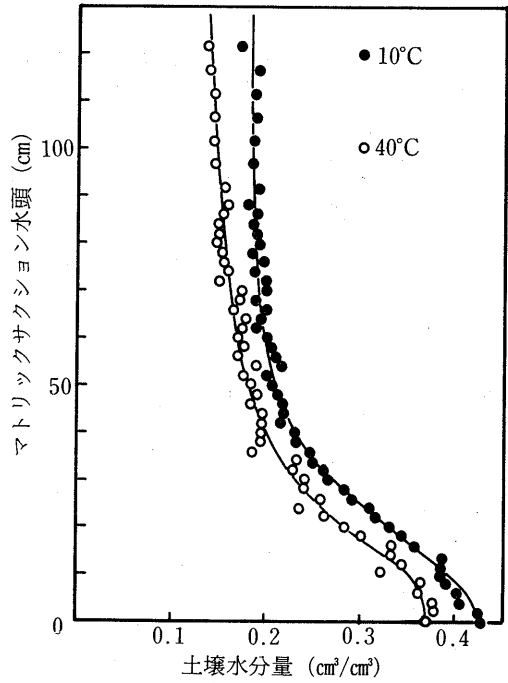


図-4 マサ土の土壌水分特性曲線

果を用いることとした。実験式のあてはめの結果はそれぞれの図に併記した。

(4) 式の左辺の  $p$  の代りに、 $-\rho gh$  を用い、負号は  $r$  の中に含めるとすると、次式が得られる。

$$h = \frac{2\sigma}{\rho gr} \quad (4')$$

上式を温度 ( $T$ ) で微分して若干変形すると、マトリックサクシジョンの温度変化率を表す式が得られる<sup>14)</sup>。

$$\frac{\Delta h}{\Delta T} = \left(\frac{h}{\sigma}\right) \frac{\Delta \sigma}{\Delta T} \quad (5)$$

ここで、密度 ( $\rho$ ) と平均曲率半径 ( $r$ ) は温度による変化が無視できるとした。(5)式において、基準となる温度を10°Cにとれば、10°Cの土壌水分特性曲線における任意のサクシジョン ( $h$ ) に対して、10°Cと任意の温度とのサクシジョンの温度変化率 ( $\Delta h/\Delta T$ ) を計算できる。一方、各温度に対してあてはめを行った実験式を用いると、基準温度10°Cの任意のサクシジョン値に対して、20°C、30°C、40°Cとの  $\Delta h/\Delta T$  が求められる。ここでは、対象とする温度を40°Cとし、砂丘砂に対しては、 $h=20, 30, 40, 50$ cm, マ

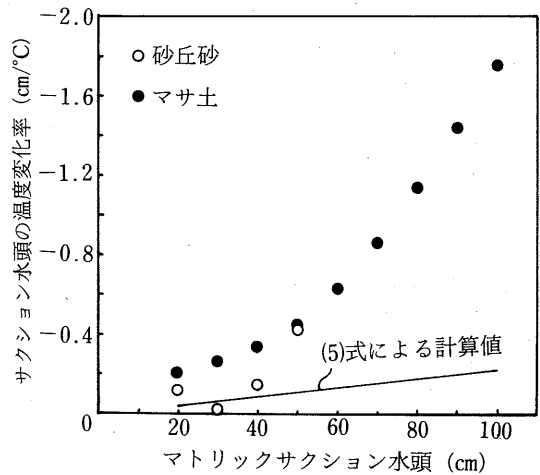


図-5 マトリックサクシジョン水頭の温度変化率

サ土に対しては、上記の4種のサクシジョン値に加えて、60, 70, 80, 90, 100cmについて  $\Delta h/\Delta T$  を求めた結果を図-5に示す。図-5にみられるように、マトリックサクシジョン水頭の温度変化率は、砂丘砂

のサクシオン値30cmの場合を除いて、すべて計算値より大きく、サクシオンが大きくなるとともに、その違いは急激に大きくなる。Wilkinson and Klute<sup>14)</sup>は、2種類の砂（粗および細）およびシルトの3種類の土壤水分特性曲線の変曲点付近の土壤水分量に対する $\Delta h/\Delta T$ を計算し、実験値は計算値に対して、それぞれ、1.2、1.9、1.9倍になったと報告し、その理由の一つとして、土壤水の表面張力は純水に比べて小さいからではないかと述べている。

表面張力の温度変化以外に影響する要素として、水の容積変化と封入空気容積変化が考えられる。Peck<sup>10)</sup>は、これらの要素に起因するマトリックサクシオン変化を理論的に解析した。Peckによる解析では、ある特定のサクシオン値で封入されている空気の容積変化のみを考慮したのに対して、Chahal<sup>2)</sup>は、サクシオンの増大による脱水の間に新しく封入される空気の容積変化を考慮した理論解析を次のように行った。まず、容積 $v$ の空気が封入されているマトリックサクシオン $h$ 、土壤水分量 $\theta$ の不飽和土壤系を考える。 $\Delta h$ のサクシオン増加によって、 $\Delta \theta$ の水分量減少がある場合、 $\Delta v$ の空気容積減少がある一方、新しく $K\Delta \theta$ の空気封入があるとするとする( $K$ は1より小の値)。封入空気は等価な半径を有する $N$ 個の気泡から成るものと仮定し、この気泡の圧力と容積に気体の状態法則を適用することによって、温度に対するサクシオンの変化率が求められる。このようにして誘導された理論式は、前に述べたように、次の三つの要因によるサクシオン変化を含む。すなわち、表面張力の変化、水の容積変化および封入空気の容積変化である。

Chahal<sup>2)</sup>は、シルトに対するマトリックサクシオンの温度変化率の実測値と上記の理論式による計算値との比較を行い、次のような結果を得た。まず、実験初めの吸水で飽和に達しなかった土壤に対して、吸水と脱水とを同一温度(5°Cおよび55°C)で行った場合、土壤水分特性曲線(脱水過程、サクシオン値10~70cmHg)におけるマトリックサクシオンの温度変化率は、土壤が封入空気を含んでいるにもかかわらず、表面張力の温度変化率による計算値にきわめてよく一致した。一方、温度25°Cで吸水し、40°Cと55°Cで脱水した場合の温度変化率は、サクシオン

が小さい場合に著しく大きく(例えば、サクシオン値20cmHgで表面張力による計算値の10倍以上)、サクシオンの増大によって急激に減少し、50cmHg付近のサクシオン値で表面張力による計算値に一致した。この温度変化率は、上記の理論式において、脱水の間に新しく封入される気泡がないとした場合( $K=0$ )の計算値とよく一致した。

次に、温度25°Cで吸水を行ってほぼ飽和した土壤を25°Cおよび40°Cで脱水した場合の土壤水分特性曲線(サクシオン値30~60cmHg)は次のようであった。まず、測定開始時のサクシオン値30cmHgでは、両者の水分量は等しかったが、サクシオンの増大に伴って、40°Cの水分量は25°Cの水分量より小さくなった。ある中間的なサクシオン値で、両者の水分量の差は最大に達し、その後、その差は再び小さくなった。この傾向について、Chahalは次のように説明している。脱水に伴って空気が新しく封入され、この空気の容積は、最初の間は大気に解放される空気の容積より大きい、後には逆の現象を示し、最終的には、封入空気はすべて排除される。したがって、マトリックサクシオンの温度変化率は、最初は表面張力による値に等しいが、後にはその値より大きくなる。温度変化率はあるサクシオン値で最大値に達した後、再び減少し始め、最終的には、表面張力による値に等しくなる。この温度変化率の最大値は表面張力による値の1.5倍程度であり、初めに飽和した土壤に対する温度変化率は不飽和状態のまま脱水を行った場合よりも、全体的には小さい。

著者らが得た結果は、図-5にみられるように、Chahalが得た結果とはかなり異なっているようにみえるかもしれないが、必ずしもそうではない。まず、Chahalの結果では、吸水と脱水を同一温度で行った場合の脱水開始直後の土壤水分量は、飽和に達しなかった土壤においても、温度の違いによって異なることはないが、吸水時と脱水時の温度が異なる場合には、とくに、脱水初期の土壤水分量に大きな差が生ずるとしている。著者らの実験においては、前に述べたように、土壤カラムに給水を開始すると同時に、実験温度の設定を開始した。砂質土壤の毛管上昇速度は大きいために、カラムの上部まで水が到達した時点では、土壤水の温度と設定温度がかなり異

なっていた可能性が大である。もしそうであれば、Chahalのいう吸水時と脱水時の温度が異なるという条件に相当する。

次に、マトリックサクシジョンの温度変化率について、Chahalの場合は、水銀柱20cmのサクシジョン値において、表面張力による値の10倍以上になっているが、水銀柱20cmは水柱では250cm以上に相当する。著者らの実験結果は水頭100cmまでのサクシジョン値に限られており、両者の温度変化率の結果を比較して論じることはできない。ChahalやPeckが主張するように、封入空気が土壌水分特性曲線の温度依存性に及ぼす影響が大きいとすれば、図-5において、サクシジョンがさらに増大し、脱水が進めば、封入空気は次第に大気に解放されるので、サクシジョンの温度変化率は小さくなるのが予想される。

以上の結果を総合すると、表面張力の温度変化率から計算される値以上のマトリックサクシジョンの温度変化率は不飽和土壌中の封入空気によるものとするのが妥当であろう。しかし、本実験では、土柱法によって土壌水分特性曲線を決定したために、得られたサクシジョンの範囲が狭く、厳密な検討ができなかった。土壌水分特性曲線を決定するための別の方法を用いたり、あるいは土壌を水で飽和する場合の温度を脱水時の温度に等しくするなど今後の実験課題として残されている。

#### ま と め

本研究は、グロウスキャビネット内において、砂質土壌の土壌水分特性曲線を土柱法によって決定し、その温度依存性を明らかにしようとしたものである。砂丘砂およびマサ土に対して得られた土壌水分特性曲線に対して、 $S_e = 1 / \{1 + (ah)^n\}^m$  という形の実験式がよく適合することが明らかになった。ここで、 $S_e$ は有効飽和度、 $h$ はマトリックサクシジョン水頭、 $a$ 、 $m$ 、 $n$ は定数である。温度10、20、30、40°Cで作成した土壌水分特性曲線は、同一のサクシジョン値に対して、高温になるほど土壌水分量が小さくなること示された。この傾向は砂丘砂よりもマサ土に顕著に認められた。サクシジョン水頭の温度変化率は表面張力の温度変化率から計算される値よりも著しく大きく、土壌中に含まれる封入空気の容積が温

度の違いならびに土壌の種類によって異なり、土壌水の保持状態に影響を及ぼすのではないかと考えられた。

#### 謝 辞

本研究は昭和56、57年度の文部省科学研究費補助金(試験研究(2))、代表者、鳥取大学農学部小谷佳人)の一部によって遂行された。本研究で参考にした文献の多くは土壌水分に関するゼミナールで用いたものであり、グループの鳥取大学農学部吉田勲、山本太平、筑紫二郎博士による討議に得るところが大きかった。また、実験に際して、鳥取大学農学工学科学生谷口誠、谷口由紀夫君の協力を得た。記して謝意を表する。

#### 参 考 文 献

1. Brooks, R. H. and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Papers, Colorado University 3 : 1-27.
2. Chahal, R. S. 1964. Effect of temperature and trapped air on the energy status of water in porous media. Soil Science 98 : 107-112.
3. ————. 1965. Effect of temperature and trapped air on matric suction. Soil Science 100 : 262-266.
4. Constantz, J. 1982. Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 46 : 466-470.
5. Gardner, W. R., D. Hillel and Y. Benyamini. 1970. Post-irrigation movement of soil water, 1. Redistribution. Water Resources Research 6 : 851-861.
6. Haverkamp, R., M. Vauclin, J. Touma, P. J. Wierenga and G. Vachaud. 1977. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J. 41 : 285-294.
7. 井上光弘・矢野友久・吉田勲・山本太平・筑紫二郎. 土壌水分特性曲線に基づく不飽和透水係数の計算. 土壌の物理性(投稿中)
8. 例えば、黒田充(訳). 1972. 非線型最適化の技

- 法. pp49-60. 培風館.
9. 榎原進. 1981. 土壤物理定数と土壤水の動態解析. 鳥取大学農学部農業工学科卒業論文. pp. 17-18.
  10. Peck, A. J. 1960. Change of moisture tension with temperature and air pressure : Theoretical. *Soil Science* 89 : 303-310.
  11. 相馬恒一. 1976. 畑地の土壤水分系に関する研究 (III) -Desorption curve equationについて-. 宇都宮大学農学部学術報告. 9 (3) : 57-74.
  12. Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 : 892-898.
  13. Vauclin, M. and G. Vachaud. 1981. Bilan hydrique dans le Sud Tunisien, 2. Modélisation numérique et prévision des transferts hydriques en sol stratifié, *J. Hydrol.* 49 : 53-73.
  14. Wilkinson, G. E. and A. Klute. 1962. The temperature effect on the equilibrium energy status of water held by porous media. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26 : 326-329.