

# 不飽和土の土中水分ヒステリシスの 計算アルゴリズム

大倉 博\*

国立防災科学技術センター

## An Algorithm for Computing Soil Moisture Content with Hysteresis

By

Hiroshi Ohkura

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

### Abstract

Mualem (1974) proposed four equations which express relation with volumetric soil moisture content ratio  $\theta$  and capillary potential  $\psi$  on and within soil moisture characteristic curves. In this work, it is pointed out that the four equations can be reduced to only one equation

$$\theta(\psi) = \theta_w(P_{n+1}) + \sum_{i=1}^n [\theta_w(P_i) - \theta_w(P_{i+1})] \frac{\theta_d(T_i) - \theta_w(T_i)}{\theta_u - \theta_w(T_i)}$$

and that  $\partial\theta/\partial\psi$  is expressed

$$\frac{\partial\theta}{\partial\psi} = \frac{\theta_u - \theta_d(T_n)}{\theta_u - \theta_w(T_n)} \cdot \frac{\partial\theta_w(P_{n+1})}{\partial\psi}$$

for wetting process and

$$\begin{aligned} \frac{\partial\theta}{\partial\psi} = & \frac{[\theta_u - \theta_w(P_n)] [\theta_u - \theta_d(T_n)]}{[\theta_u - \theta_w(T_n)]^2} \cdot \frac{\partial\theta_w(P_{n+1})}{\partial\psi} \\ & + \frac{\theta_w(P_n) - \theta_w(T_n)}{\theta_u - \theta_w(T_n)} \cdot \frac{\partial\theta_d(P_{n+1})}{\partial\psi} \end{aligned}$$

for drainage process, where  $\theta_w(\psi)$  and  $\theta_d(\psi)$  are relations with  $\theta$  and  $\psi$  of main wetting process and main drying process respectively, and  $\theta_u$  is value of  $\theta$  at the saturating cross point of  $\theta_w(\psi)$  and  $\theta_d(\psi)$  (and  $\psi_{max}$  is value of  $\psi$  at this point).  $P_i$  and  $T_i$  are past and current values of  $\psi$ .  $P_i$ ,  $T_i$  and  $n$  are obtained by the following operations.

<Operation> Examine new variation of  $\psi$  upon following test. If  $\psi \leq \psi_{zero}$ , where  $\psi_{zero}$  is defined as value of  $\psi$  at the drying cross point of  $\theta_w$  and  $\theta_d$ , then execute <Op. 1>. If  $\psi_{zero} < \psi < \psi_{max}$ , then execute <Op. 3> for wetting process and <Op. 4> for drying process. If  $\psi \geq \psi_{max}$ , then execute <Op. 2>.

<Op. 1> Let  $n \leftarrow 1$ ,  $P_1 \leftarrow \psi_{zero}$ ,  $T_1 \rightarrow \psi_{zero}$  and  $T_2 \leftarrow \psi$ , where " $\leftarrow$ " means the operation substituting value of right side to variable of left side. Return to <Operation>.

<Op. 2> Let  $n \leftarrow 1$ ,  $p_1 \leftarrow \psi_{max}$ ,  $T_1 \leftarrow \psi_{max}$  and  $T_2 \leftarrow \psi$ . Return to <Operation>.

<Op. 3> If  $T_1 = \psi_{zero}$ , then execute <Op. 3-1>. If  $T_1 \neq \psi_{zero}$  and  $\psi \leq T_n$ , then execute <Op. 3-2>. If  $T_1 \neq \psi_{zero}$  and  $\psi > T_n$ , then execute <Op. 3-3>. <Op. 3-1> Let  $n \leftarrow 1$ ,  $T_1 \leftarrow \psi$  and  $P_2 \leftarrow \psi$ . Return to <Operation>. <Op. 3-2> Find the maximum value of  $i$  that satisfies  $i \leq n$  and  $\psi \leq T_i$ , then let  $n \leftarrow i$ ,  $T_n \leftarrow \psi$  and  $P_{n+1} \leftarrow \psi$ . Return to <Operation>. <Op. 3-3> Let  $n \leftarrow n+1$ ,  $T_n \leftarrow \psi$  and  $P_{n+1} \leftarrow \psi$ . Return to <Operation>.

<Op. 4> If  $\psi < P_n$ , then execute <Op. 4-1>. If  $P_n \leq \psi < P_1$ , then execute <Op. 4-2>. If  $\psi \geq P_1$ , then execute <Op. 4-3>.

<Op. 4-1> Let  $P_{n+1} \leftarrow \psi$ . Return to <Operation>.

<Op. 4-2> Find the maximum value of  $i$  that satisfies  $i \leq n$  and  $\psi \geq P_i$ , then let  $n \leftarrow i-1$  and  $P_{n+1} \leftarrow \psi$ . Return to <Operation>.

<Op. 4-3> Let  $n \leftarrow 1$ ,  $P_1 \leftarrow \psi$ ,  $T_1 \leftarrow \psi_{zero}$  and  $P_2 \leftarrow \psi$ . Return to <Operation>.

\*第4 研究部計測研究室

はじめに

不飽和土の体積含水率（以下、含水率という）と毛管ポテンシャル  $\psi$  との関係はヒステリシスを生じ、一価関数であらわせない。

Richards (1931) の毛管ポテンシャル理論に基づく土中の飽和・不飽和浸透流は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(K \nabla(\phi)) \quad \dots\dots(1)$$

または

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla(K \nabla(\phi)) \quad \dots\dots(2)$$

であらわされる。ここで  $t$  は時間、 $K$  は透水係数、 $\phi$  は全ポテンシャル、 $\psi$  は毛管ポテンシャルである。(1) 式と (2) 式は非線型偏微分方程式になるため、一般に電子計算機を用いて数値的に解かれる。このとき、境界条件と初期条件のほかに、 $\theta$  と  $\psi$  との関係式と、 $K$  と  $\psi$  との関係式が必要になる。

本報告は、電子計算機を用いて(1)式または(2)式の数値解を得るときに必要な  $\theta$  と  $\psi$  とのヒステリシス関係を、Mualem (1977) のモデルを用いて計算するアルゴリズムを述べる。

土中水分ヒステリシス

体積含水率と毛管ポテンシャルがそれぞれ  $\theta_{\max}$  と  $\psi_{\max}$  の飽和状態から最小容水量  $\theta_{\min}$  とこれに対応する毛管ポテンシャル  $\psi_{\min}$  まで減少するときの  $\theta$ - $\psi$  の経路は模式的に図1の曲線 ABX であらわされる。次に、 $\psi$  が増加に転じ、 $\psi_{\min}$  から  $\psi_{\max}$  まで増加するときの経路は XBCJD であらわされる。このとき  $\psi = \psi_{\max}$  で、 $\theta = \theta_u (< \theta_{\max})$  になるのは、土中の空隙に空気が気泡となって捕捉されているためである。さらに、 $\psi$  が減少に転じ、 $\psi_{\max}$  から  $\psi_{\min}$  まで減少するときの経路は DEF BX であらわされる、このうち、BCJD と DEF B をそれぞれ「主ループ吸水過程」の曲線と「主ループ排水過程」の曲線と呼び、それぞれ、関数  $\theta = \theta_w(\psi)$  と  $\theta = \theta_d(\psi)$  であらわす、 $\theta_w(\psi)$  と  $\theta_d(\psi)$  は曲線 XB をもあらわし、XB 上で  $\theta = \theta_w = \theta_d(\psi)$  とする。また、B 点の  $\psi$  の値を  $\psi_{\text{zero}}$  とする。

$\psi$  が図1のD点の  $\psi_{\max}$  から  $\psi_F$  まで減少した後  $\psi_G$  まで増加し、その後  $\psi_H$  まで減少しさらに  $\psi_I$  まで増加するときの経路は図1の DEF GHI になる。また、 $\psi$  が図1のB点の  $\psi_{\text{zero}}$  から  $\psi_J$  まで増加した後  $\psi_K$  まで減少し、その後  $\psi_L$  まで増加しさらに  $\psi_M$  まで減少するときの経路は BCJKLM になる。

これらの経路のうち、FG を「初期吸水過程」の走査線と呼び、JK を「初期排水過程」の走査線、HI と KL を「吸水と排水を繰返した後の吸水過程」の走査線、GH と LM を「吸水と排水を繰返した後の排水過程」の走査線と呼ぶ。

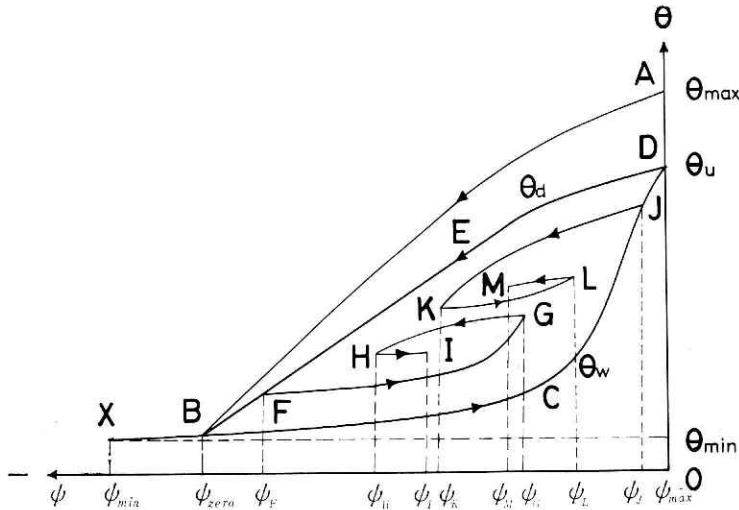


図 1 不飽和土の土中水分ヒステリシスの概念図

BCJD は主ループ吸水過程の曲線，DEFB は主ループ排水過程の曲線である．FG は初期吸水過程の走線，JK は初期排水過程の走査線である．HI と KL は吸水と排水を繰返した後の吸水過程の走査線，GH と LM は吸水と排水を繰返した後の排水過程の走査線である．

Fig. 1 Schematic representation of capillary hysteresis.

Paths BCJD, DEFB, FG and JK are curve of main wetting process, curve of main drying process, primary wetting scanning curve and primary drying scanning curve, respectively. Paths HI and KL are scanning curve of wetting after a series of alternating process of drainage and imbibition. Paths GH and LM are scanning curve of drainage after a series of alternating process of drainage and imbibition.

土中水分のヒステリシスの研究は Poulouvasilis (1962), Philip (1964), Topp (1971), Mualem (1974) 等によりなされている。Poulouvasilis の方法はヒステリシス主ループ内の任意の走査線を計算するために、あらかじめ実験により適当な本数の初期吸水過程の走査線の  $\theta$  と  $\psi$  との関係を求めなければならない。Philip の方法は主ループの  $\theta$  と  $\psi$  との関係  $\theta_w$  と  $\theta_d$  のみを用いて任意の走査線を計算できるが、走査線が主ループ外に飛び出る欠点を持つ。Topp の方法は排水過程の空気の浸入と吸水過程の水の浸入に対する抵抗を考慮しているが、この方法も走査線が主ループ外に飛び出る欠点を持つ。Mualem の方法はヒステリシス主ループ曲線  $\theta_w$  と  $\theta_d$  のみを用いて、任意の走査線を比較的簡単に計算できる。しかも、この走査線はヒステリシス主ループ外に飛び出ることはなく、常にループ内に留まっている。

### Mualem モデル

Mualem (1974) は多孔質体の空隙を細孔群の集合と仮定し、さらに吸水と排水において細孔間に干渉が生じないと仮定し、以下の概念モデルを提案した。

水と孔壁との接触角を一定とすれば、半径  $R$  の孔にはる水のメニスカニにより生じる毛管ポテンシャル  $\psi$  と  $R$  は

$$R \propto 1/|\psi| \quad \dots\dots(1)$$

の関係を持つ、細孔の開孔端の半径を  $r$ 、細孔内の半径を  $\rho$  とし、 $R_{\min}$  と  $R_{\max}$  をそれぞれ(1)において  $\psi_{\min}$  と  $\psi_{\max}$  に対応する  $R$  の値とし、 $r$ 、 $\rho$ 、 $R$  を正規化する。

$$\bar{r} = \frac{r - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad \dots\dots(2)$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad \dots\dots(3)$$

$$\bar{R} = \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad \dots\dots(4)$$

このとき、 $r$  と  $\rho$  と  $R$  がそれぞれ  $R_{\min}$  から  $R_{\max}$  に変化すると、 $\bar{r}$  と  $\bar{\rho}$  と  $\bar{R}$  は 0 から 1 に変化する。

$\psi$  が  $\psi_{\min}$  と  $\psi_{\max}$  の間で変化するとき、細孔群は以下のプロセスで吸・排水されると仮定する。 $\psi$  が  $\psi(\bar{R})$  から  $\psi(\bar{R} + d\bar{R})$  に増加する吸水過程において、細孔群の  $\bar{R} \leq \bar{\rho} \leq \bar{R} + d\bar{R}$  なる孔内半径を持つ部分の全てが水に満される。一方、 $\psi(\bar{R})$  から  $\psi(\bar{R} - d\bar{R})$  に減少する排水過程において、 $\bar{R} \leq \bar{r} \leq 1$  なる開孔半径を持つ細孔群の孔内半径が  $\bar{R} - d\bar{R} \leq \bar{\rho} \leq \bar{R}$  の部分のみが排水される。

このプロセスによると、図1で示された各経路において、細孔群の水に満されている部分が、 $\bar{r}$  と  $\bar{\rho}$  とを軸にする2次元平面上に投影される。この投影された図を領域図と呼ぶ。主ループ吸水過程に対する領域図は図2に示され、ハッチングされた領域の細孔群が水に満されている。主ループ排水過程、初期吸水過程、初期排水過程、吸水と排水を繰返した後の吸水過程、吸水と排水を繰返した後の排水過程の領域図がそれぞれ、図3、図4、図5、図6、図7に示される。

領域図と含水率とを結びつけるために、密度関数  $f(\bar{\rho}, \bar{r})$  を次のように定義する。単位体積の多孔質において、 $\bar{r}$  から  $\bar{r} + d\bar{r}$  の開孔半径を持つ細孔群のうち孔内半径が  $\bar{\rho}$  から  $\bar{\rho} + d\bar{\rho}$  の部分の体積は

$$f(\bar{\rho}, \bar{r}) d\bar{\rho} d\bar{r} \quad \dots\dots(5)$$

である。

有効体積含水率（以下、有効含水率という） $\theta'$  を

$$\theta' = \theta - \theta_{\min} \quad \dots\dots(6)$$

とすると、有効含水率は

$$\theta' = \iint_{\Omega} f(\bar{\rho}, \bar{r}) d\bar{\rho} d\bar{r} \quad \dots\dots(7)$$

となる。ここで、積分範囲  $\Omega$  は領域図のハッチングされた領域である。

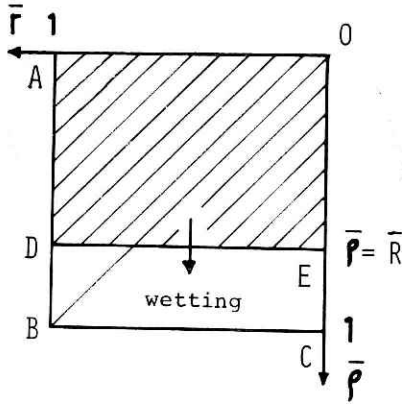


図 2 主ループ吸水過程の領域図  
ハッチングで示される領域の細孔が水に満されている。吸水過程が継続するとき辺DEが下方に移動し、領域が拡大する。

Fig. 2 The filled pore diagram in the  $\bar{r}, \bar{\rho}$  plane for main wetting process.

The shadowed domain indicates portion of pore filled with water. At this wetting process the domain is expanded by moving the side DE downward.

Table. 1 Correspondence of  $\phi_j$  with  $P_i$  or  $T_i$ , and  $N$  with  $n$  for main wetting process.

$i$	1	2
$P_i$	$\phi$	$\phi$
$T_i$	$\phi_{zero}$	
	$n = 1$	

$f(\bar{r}, \bar{\rho})$ が変数関数  $h(\bar{r})$  と  $l(\bar{\rho})$  の積

$$f(\bar{r}, \bar{\rho}) = h(\bar{r})l(\bar{\rho}) \quad \dots\dots(8)$$

であらわされると仮定する。さらに、 $L(\bar{R}), H(\bar{R})$ を

$$L(\bar{R}) = \int_0^{\bar{R}} l(\bar{\rho}) d\bar{\rho} \quad \dots\dots(9) \quad H(\bar{R}) = \int_0^{\bar{R}} h(\bar{r}) d\bar{r} \quad \dots\dots(10)$$

と定義する。このとき主ループ吸水過程の有効含水率  $\theta'_w$  は図2から

$$\theta'_w(\bar{R}) = L(\bar{R})H(1) \quad \dots\dots(11)$$

となる。また、主ループ排水過程の有効含水率  $\theta'_d$  は図4から

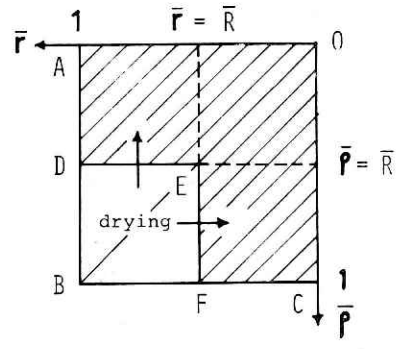


図 3 主ループ排水過程の領域図  
ハッチングで示される領域の細孔が水に満されている。排水過程が継続するとき、辺DEが上方に、辺EFが右方に移動して領域が縮小する。このとき頂点Eは対角線BO上を移動する。

Fig. 3 The filled pore diagram in the  $\bar{r}, \bar{\rho}$  plane for main drying process.

The shadowed domain indicates portion of pore filled with water. At this drying process the domain is reduced by moving the side DE upward and the side EF to the right. And the point E moves along a diagonal line of OB.

Table. 2 Correspondence of  $\phi_j$  with  $P_i$  or  $T_i$ , and  $N$  with  $n$  for main drying process.

$i$	1	2
$P_i$	$\phi_{max}$	$\phi$
$T_i$	$\phi$	
	$n = 1$	

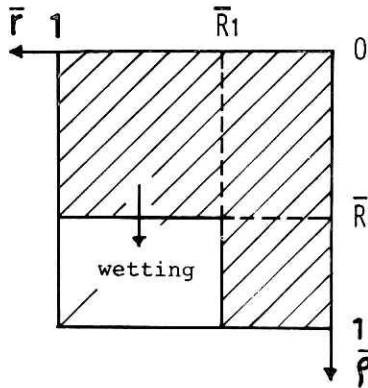


図4 初期吸水過程に対する領域図  
Fig. 4 The filled pore diagram in the  $\bar{r}, \bar{\rho}$  plane for primary wetting scanning curve.

Table. 3 Correspondence of  $\phi_j$  with  $P_i$  or  $T_i$ , and  $N$  with  $n$  for primary wetting scanning curve

$i$	1	2
$P_i$	$\phi$	$\phi$
$T_i$	$\phi_{zero}$	

$n = 1$

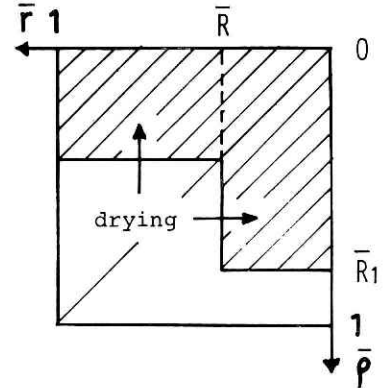


図5 初期排水過程に対する領域図  
Fig. 5 The filled pore diagram in the  $\bar{r}, \bar{\rho}$  plane for primary drying scanning curve.

Table. 4 correspondence of  $\phi_j$  with  $P_i$  of  $T_i$ , and  $N$  with  $n$  for primary drying scanning curve.

$i$	1	2
$P_i$	$\phi_1$	$\phi$
$T_i$	$\phi$	

$n = 1$

$$\theta'_a(\bar{R}) = L(\bar{R}) \div [L(1) - L(\bar{R})] H(\bar{R}) \quad \dots\dots(12)$$

となる。  $H(1)=1$  とし、さらに、  $\bar{R}$  と  $\phi$  との一対一対応から  $L, H, \theta'_w, \theta'_a$  を  $\phi$  の関数であらわすと、(11), (12)式から次式が求まる。

$$L(\phi) = \theta'_w(\phi) \quad \dots\dots(13)$$

$$H(\phi) = [\theta'_a(\phi) - \theta'_w(\phi)] / [\theta'_u - \theta'_w(\phi)] \quad \dots\dots(14)$$

初期吸水過程の有効含水率は、図4の領域図から

$$\begin{aligned} \theta'(\phi_{max}, \phi_1, \phi) &= L(\phi) + H(\phi_1) [L(\phi_{max}) - L(\phi)] \\ &= \theta'_w(\phi) + \frac{\theta'_u - \theta'_w(\phi)}{\theta'_u - \theta'_w(\phi_1)} [\theta'_a(\phi) - \theta'_w(\phi_1)] \end{aligned} \quad \dots\dots(15)$$

なると。ここで、左辺  $\theta'(\phi_{max}, \phi_1, \phi)$  は  $\phi$  が  $\phi_{max}$  から  $\phi_1$  まで減少したのち、  $\phi$  まで増加したことを示す。

初期排水過程の有効含水率は、図5の領域図から

$$\theta'(\phi_{min}, \phi_1, \phi) = \theta'_w(\phi) + \frac{\theta'_a(\phi_1) - \theta'_w(\phi)}{\theta'_u - \theta'_w(\phi)} [\theta'_a(\phi) - \theta'_w(\phi)] \quad \dots\dots(16)$$

となる。このとき、  $\phi$  の経歴は  $\phi_{min}$  から  $\phi_1$  まで増加した後  $\phi$  に減少している。

吸水と排水を繰返した後の吸水過程は図6の領域図から

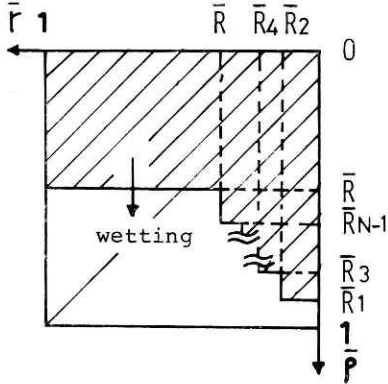


図 6 吸水と排水を繰返した後の吸水過程に対する領域図  
 Fig. 6 The filled pore diagram in the  $\bar{r}, \bar{\rho}$  plane for wetting after a series of alternating process of drainage and imbibition.

Table 5 Correspondence of  $\phi_j$  with  $P_i$  or  $T_i$ , and  $N$  with  $n$  for wetting after a series of alternating process of drainage and imbibition.

$i$	1	3	•	•	$n$	$n+1$
$P_j$	$\phi_1$	$\phi_3$	•	•	$\phi_{N-1}$	$\phi$
$T_i$	$\phi_2$	$\phi_4$	•	•	$\phi_N$	
					$n=N/2$	

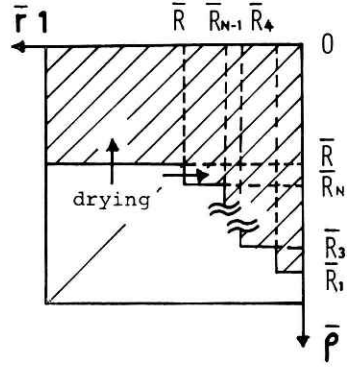


図 7 吸水と排水を繰返した後の排水過程に対する領域図  
 Fig. 7 The filled pore diagram in the  $\bar{r}, \bar{\rho}$  plane for drying after a series of alternating process of drainage and imbibition.

Table 6 Correspondence of  $\phi_j$  with  $P_i$  or  $T_i$ , and  $N$  with  $n$  for drying after a series of alternating process of drainage and imbibition.

$i$	1	2	•	•	$n$	$n+1$
$P_i$	$\phi_1$	$\phi_3$	•	•	$\phi_N$	$\phi$
$T_i$	$\phi_2$	$\phi_4$	•	•	$\phi$	
					$n=(N+1)/2$	

$$\theta'(\phi_{\min} \phi_1 \dots \phi_N) = \theta'_w(\phi) + [\theta'_w(\phi_{N-1}) - \theta'_w(\phi)] \frac{\theta'_a(\phi_N) - \theta'_w(\phi_N)}{\theta'_u - \theta'_w(\phi_N)} + \sum_{j=1}^{(N/2)-1} [\theta'_w(\phi_{2j-1}) - \theta'_w(\phi_{2j+1})] \frac{\theta'_a(\phi_{2j}) - \theta'_w(\phi_{2j})}{\theta'_u - \theta'_w(\phi_{2j})} \dots (17)$$

になる。

吸水と排水を繰返した後の排水過程は図 7 の領域図から

$$\theta'(\phi_{\min} \phi_1 \dots \phi_N) = \theta'_w(\phi) + [\theta'_w(\phi_N) - \theta'_w(\phi)] \frac{\theta'_a(\phi) - \theta'_w(\phi)}{\theta'_u - \theta'_w(\phi)} + \sum_{j=1}^{(N-1)/2} [\theta'_w(\phi_{2j-1}) - \theta'_w(\phi_{2j+1})] \frac{\theta'_a(\phi_{2j}) - \theta'_w(\phi_{2j})}{\theta'_u - \theta'_w(\phi_{2j})} \dots (18)$$

になる。

### 計算アルゴリズム

(15), (16), (17), (18)式は有効含水率  $\theta'$ ,  $\theta'_u$ ,  $\theta'_w$ ,  $\theta'_a$  をそれぞれ含水率  $\theta$ ,  $\theta_u$ ,  $\theta_w$ ,  $\theta_a$  に置換えても成立する。(15), (16), (17), (18)式はそれぞれ表 3, 表 4, 表 5, 表 6 に示される  $\phi_j$  と  $P_i$  と  $T_i$ ,  $N$  と  $n$  との対応関係を用いて  $\phi_j$  を  $P_i$  と  $T_i$  に置き変えると

$$\theta(\psi) = \theta_w(P_{n+1}) + \sum_{i=1}^n (\theta_w(P_i) - \theta_w(P_{i+1})) \frac{\theta_a(T_i) - \theta_w(T_i)}{\theta_u - \theta_w(T_i)} \quad \dots\dots(19)$$

であらわされる。さらに、表1と表2を参照すると、(19)式は主ループ吸水過程の曲線 $\theta_w$ と主ループ排水過程の曲線 $\theta_a$ をもあらわせることがわかる。

$\partial\theta/\partial\psi$ は吸水過程と排水過程に対し、それぞれ次式であらわされる。

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial\psi}\right)_{\text{wetting}} = \frac{\theta_u - \theta_a(T_n)}{\theta_u - \theta_w(T_n)} \cdot \frac{\partial\theta_w(P_{n+1})}{\partial\psi} \quad \dots\dots(20)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial\theta}{\partial\psi}\right)_{\text{drying}} &= \frac{[\theta_u - \theta_w(P_n)][\theta_u - \theta_a(T_n)]}{[\theta_u - \theta_w(T_n)]^2} \cdot \frac{\partial\theta_w(P_{n+1})}{\partial\psi} \\ &+ \frac{\theta_w(P_n) - \theta_w(T_n)}{\theta_u - \theta_w(T_n)} \cdot \frac{\partial\theta_a(P_{n+1})}{\partial\psi} \quad \dots\dots(21) \end{aligned}$$

図7に示される吸水と排水を繰返した後の排水過程から吸水に転じ、 $\psi$ が $\psi_1 \leq \psi < \psi_{\max}$ まで増大すると、 $\theta$ と $\psi$ との関係は図2に示される主ループ吸水過程になる。このとき図7の $\bar{R}_1$ から $\bar{R}_N$ の値は消滅し $\psi_j$ と $P_i$ と $T_i$ との対応関係も表6から表1に変わる。このように $\psi$ の任意の変動に追隨して $\psi_j$ と $P_i$ と $T_i$ との対応を適宜修正すると、 $\theta$ は(19)式のみで、 $\partial\theta/\partial\psi$ は(20)式または(21)式を用いて計算できる。

$\psi \leq \psi_{\text{zero}}$ なる $\psi$ に対して、 $\theta_w$ と $\theta_a$ は等しくなるから、 $T_i \leq \psi_{\text{zero}}$ なる $T_i$ に対し(19)の右辺第2項は零になる。 $\theta_w(\psi)$ と $\theta_a(\psi)$ は曲線であらわされ、電子計算機といえども計算に時間を要するから、演算時間の短縮のため $T_i \leq \psi_{\text{zero}}$ なる $T_i$ に対して(19)式の右辺第2項に零を代入すれば良い。この計算の省略を考慮した $\psi_j$ と $P_i$ と $T_i$ 、 $N$ と $n$ との対応表の修正のアルゴリズムを以下の操作に示す。操作において、記号「 $\leftarrow$ 」は右辺の値を左辺に代入することを意味する。

<操 作>

毛管ポテンシャルの変動後(新しい計算ステップ)の $\psi$ について以下の検査を行う。 $\psi \leq \psi_{\text{zero}}$ を検査し合格ならば<操作1>を実行する。 $\psi_{\text{zero}} < \psi < \psi_{\max}$ の検査を行ない合格ならば、排水過程に対し<操作3>を実行し、吸水過程に対し<操作4>を実行する。 $\psi_{\max} \leq \psi$ を検査し、合格ならば<操作2>を実行する。

<操作1>  $n \leftarrow 1$ ,  $P_1 \leftarrow \psi_{\text{zero}}$ ,  $T_1 \leftarrow \psi_{\text{zero}}$ ,  $T_2 \leftarrow \psi$ とする。<操作>にもどる。

<操作2>  $n \rightarrow 1$ ,  $P_1 \leftarrow \psi_{\max}$ ,  $T_1 \leftarrow \psi_{\max}$ ,  $T_2 \leftarrow \psi$ とする。<操作>にもどる。

<操作3>  $T_1 = \psi_{\text{zero}}$ を検査する。合格ならば<操作3-1>を実行する。 $T_1 \neq \psi_{\text{zero}}$ かつ $\psi \leq T_n$ を検査する。合格ならば<操作3-2>を実行する。 $T_1 \neq \psi_{\text{zero}}$ かつ $\psi > T_n$ を検査する。合格ならば<操作3-3>を実行する。

<操作3-1>  $n \leftarrow 1$ ,  $T_1 \leftarrow \psi$ ,  $P_2 \leftarrow \psi$ とする。<操作>にもどる。

<操作3-2>  $\psi \leq T_i$ を満たす最大の $i$ を求め、 $n \leftarrow i$ ,  $T_n \leftarrow \psi$ ,  $P_{n+1} \leftarrow \psi$ とする。<操作>に



もどる。

- <操作3-3>  $n \leftarrow n \div 1, T_n \leftarrow \phi, P_{n+1} \leftarrow \phi$  とする。 <操作>にもどる。
- <操作4>  $\phi < P_n$  を検査する。合格ならば <操作4-1> を実行する。  $P_n \leq \phi < P_1$  を検査する。合格ならば <操作4-2> を実行する。  $\phi \geq P_1$  を検査する。合格ならば <操作4-3> を実行する。
- <操作4-1>  $P_{n+1} \leftarrow \phi$  とする。 <操作>にもどる。
- <操作4-2>  $i \leq n$  かつ  $\phi \geq P_i$  なる最少の  $i$  を求め、  $n \leftarrow i-1, P_{n+1} \leftarrow \phi$  とする。 <操作>にもどる。
- <操作4-3>  $n \leftarrow 1, P_1 \leftarrow \phi, T_1 \leftarrow \phi_{zero}, P_1 \leftarrow \phi$  とする。 <操作>にもどる。

以上のアルゴリズムによる  $P_i$  と  $T_i$  を用い、  $\theta$  と  $\partial\theta/\partial\phi$  の計算結果を図8に示す。この計算において  $\theta_w$  と  $\theta_a$  などは、

$$\theta_w(\phi) = 0.13369 \tan(0.12148\phi + 1.078) + 0.2499827 \quad \dots\dots(22)$$

$$\theta_a(\phi) = \sqrt{0.00024\phi^2 + 0.0081} + 0.27 \quad -30 < \phi < 0 \quad \dots\dots(23)$$

$$= 0.004\phi + 0.4042 + 0.00392731 \{1 - \cos(0.10185\phi + 6.1917155)\} \\ - 91.69 < \phi \leq -30 \quad \dots\dots(24)$$

$$\theta_u = 0.36, \quad \phi_{max} = 0, \quad \phi_{zero} = -91.69$$

$\phi$  の単位: cmH<sub>2</sub>O

である。

また、実行プログラムを付録に示す。使用計算機は ACOS700 である。SUBROUTINE EWA が  $P_i$  と  $T_i$  の修正を行ない、さらに  $\theta$  と  $\partial\theta/\partial\phi$  の計算も行なう。  $\phi$  が一ステップ前の値に等しく、吸水過程と排水過程の判別がつかない場合は、  $\phi$  の直前の変動を以って判定する。

FUNCTION FEW1 が  $\theta_w$  と  $\partial\theta_w/\partial\theta$  を与え、FUNCTION FED1 が  $\theta_a$  と  $\partial\theta_a/\partial\phi$  を与える。

図8  $\theta$  と  $\partial\theta/\partial\phi$  のヒステリシス計算結果

Fig. 8 Calculated results.

$\theta-\phi$  relation of main wetting process ( $\theta_w$ ) and main drying process ( $\theta_a$ ) are

$$\theta_w(\phi) = 0.13369 \tan(0.12148\phi + 1.078) + 0.2499827$$

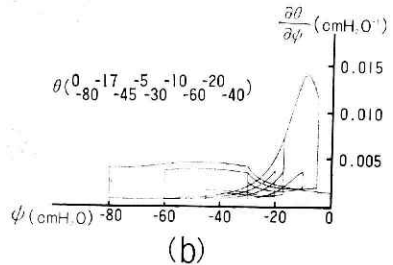
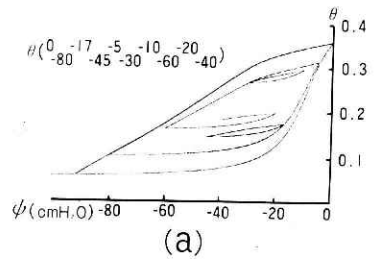
$$\theta_a(\phi) = \sqrt{0.00024\phi^2 + 0.0081} + 0.27 \quad -30 < \phi \leq 0$$

$$= 0.004\phi + 0.4042 + 0.00392731 \cdot \{1 - \cos(0.10185\phi + 6.1917155)\} \\ - 91.69 < \phi \leq -30$$

$$= \theta_w(\phi) \quad \phi < -91.69$$

(a) is calculated moisture content  $\theta(\phi)$ .

(b) is calculated derived moisture content  $\partial\theta/\partial\phi$ .



参 考 文 献

- 1) Mualem, A. (1974) : A Conceptual Model of Hysteresis, *Water Resources Research*, Vol.10, No.3, 514-520.
- 2) Philip, J. R. (1964) : Similarity Hypothesis for Capillary Hysteresis in Porous Materials, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 69, No. 8, 1553-1562.
- 3) Poulouvassilis, A. (1962) : Hysteresis of Pore Water, an Application of the Concept of Independent Domains, *Soil Sci.*, 93, 405-412.
- 4) Richards L. A. (1931) : Capillary Conduction of Liquids through porous Mediums, *Physics*. Vol. 1, 318-333.
- 5) Topp, G. C. (1971) : Soil-water Hysteresis : The Domain Theory Extended to Pore Interaction Conditions, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Vol. 35, 219-225.

(1980年12月9日 原稿受理)

付録

① プログラム

```

1 C ***** TEST PROGRAM OF SUBROUTINE EWA *****
2 C
3 C
4 C
5 C
6 C
7 C
8 C ***** SYMBOLS IN THIS PROGRAM *****
9 C
10 C
11 C
12 C
13 C DEDPST : DERIVED FUNCTION OF  $\theta$  WITH HYSTERESIS.
14 C
15 C E : VOLUMETRIC MOISTURE CONTENT WITH HYSTERESIS (HFTIA).
16 C
17 C EU : VALUE OF THETA AT THE SATURATING CROSS POINT OF 'FEMT'
18 C AND 'FEDT'.
19 C
20 C E-W : SUBROUTINE CALCULATING HYSTERESIS PATH, 'E' AND 'DEDPST'.
21 C
22 C FFDT : FUNCTION OF THETA AT MAIN DRYING PROCESS.
23 C
24 C FFMT : DERIVED FUNCTION OF THETA AT MAIN DRYING PROCESS.
25 C
26 C FEM-T : DERIVED FUNCTION OF THETA AT MAIN WETTING PROCESS.
27 C
28 C FEM-T : FUNCTION OF THETA AT MAIN WETTING PROCESS.
29 C
30 C FSAT-T : FUNCTION OF THETA AT SATURATION.
31 C
32 C FSHT-T : DERIVED FUNCTION OF THETA AT SATURATION.
33 C
34 C JCHAR : JUDGEMENT OF WETTING OR DRYING BY CHARACTER.
35 C
36 C JCHDRY : CHARACTER 'DRY'.
37 C
38 C JCHWET : CHARACTER 'WET'.
39 C
40 C JDR-T : JUDGEMENT OF WETTING OR DRYING.
41 C JDRW-T : WETTING.
42 C JDRD-T : DRYING.
43 C
44 C L-PT : DIMENSION LENGTH OF ARRAY 'P' AND 'T'.
45 C
46 C N : ACTUALLY USED NUMBER OF 'P' AND 'T'.
47 C
48 C P : BUFFER TO REMEMBER HYSTERESIS PATH.
49 C
50 C PSI : CAPILLARY POTENTIAL.
51 C
52 C PSI-MAX : CAPILLARY POTENTIAL AT THE SATURATING CROSS POINT OF
53 C AND 'FEDT'.
54 C
55 C PSIZER : CAPILLARY POTENTIAL AT THE DRYING CROSS POINT OF 'FEMT'
56 C AND 'FEDT'.
57 C
58 C
59 C
60 C
61 C
62 C
63 C
64 C
65 C
66 C
67 C
68 C
69 C
70 C
71 C
72 C
73 C
74 C
75 C
76 C
77 C
78 C
79 C
80 C
81 C
82 C
83 C
84 C
85 C
86 C
87 C
88 C
89 C
90 C
91 C
92 C
93 C
94 C
95 C
96 C
97 C
98 C
99 C
100 C
101 C
102 C
103 C
104 C
105 C
106 C
107 C
108 C
109 C
110 C
111 C
112 C
113 C
114 C
115 C
116 C
117 C
118 C
119 C
120 C
121 C
122 C
123 C
124 C
125 C
126 C
127 C
128 C
129 C
130 C
131 C
132 C
133 C
134 C
135 C
136 C
137 C

```

③ サブルーチン EWA

②  
 フังก์ション  
 FED1,  
 FEW1,  
 FSAT1

③-1

```

1  C      FUNCTION FEW1(PST)
2  C      DATA A1,B1,C1 /0.00026,0.0081,0.27/
3  C      DATA A2 /0.00012/
4  C      DATA A2,B2 /0.004,0.4121/
5  C      DATA A3,B3,C3 /0.003273170,10185,6.1917155/
6  C
7  C
8  C      IF(PST.LE.-10.) GO TO 1010
9  C      XX=1+PST
10 C      FEW1=SQRT(XX)
11 C      RETURN
12 C
13 C      1010 FEW1=A2+PST+A3*(1.-COS(B3*PST+C3))
14 C      RETURN
15 C
16 C      ENTRY FEW1(PST)
17 C
18 C      IF(PST.LE.-10.) GO TO 2010
19 C      XX=1+PST*BT
20 C      FEW1=A1Z/SQRT(XX)
21 C      RETURN
22 C
23 C      2010 FEW1=A2
24 C      FEW1=A2+A3*B3*SIN(R3*PST+C3)
25 C      RETURN
26 C
27 C
28 C      END
29 C
30 C      FUNCTION FSAT1(PST)
31 C      DATA A /0.13369/
32 C      DATA B /0.249984274/
33 C      DATA ALPHA /0.12167/
34 C      DATA BETA /1.0780/
35 C
36 C      DATA AB /0.0162406612/
37 C
38 C      XX=ALPHA*PST+BETA
39 C      FEW1=DATAN(XX)+B
40 C      RETURN
41 C
42 C      ENTRY FEW1(PST)
43 C
44 C      XX=ALPHA*PST+BETA
45 C      FEW1=AB/XX
46 C      RETURN
47 C
48 C      END
49 C
50 C      FUNCTION FSAT1(PST)
51 C      FSAT1=0.36
52 C      RETURN
53 C
54 C      ENTRY FSAT1(PST)
55 C      FSAT1=0.
56 C      RETURN
57 C      END
58 C
59 C
60 C
61 C
62 C
63 C
64 C
65 C
66 C
67 C
68 C
69 C
70 C
71 C
72 C
73 C
74 C
75 C
76 C
77 C
78 C
79 C
80 C
81 C
82 C
83 C
84 C
85 C
86 C
87 C
88 C
89 C
90 C
91 C
92 C
93 C
94 C
95 C
96 C
97 C
98 C
99 C
100 C
101 C
102 C
103 C
104 C
105 C
106 C
107 C
108 C
109 C
110 C
111 C
112 C
113 C
114 C
115 C
116 C
117 C
118 C
119 C
120 C
121 C
122 C
123 C
124 C
125 C
126 C
127 C
128 C
129 C
130 C
131 C
132 C
133 C
134 C
135 C
136 C
137 C
138 C
139 C
140 C
141 C
142 C
143 C
144 C
145 C
146 C
147 C
148 C
149 C
150 C
151 C
152 C
153 C
154 C
155 C
156 C
157 C
158 C
159 C
160 C
161 C
162 C
163 C
164 C
165 C
166 C
167 C
168 C
169 C
170 C
171 C
172 C
173 C
174 C
175 C
176 C
177 C
178 C
179 C
180 C
181 C
182 C
183 C
184 C
185 C
186 C
187 C
188 C
189 C
190 C
191 C
192 C
193 C
194 C
195 C
196 C
197 C
198 C
199 C
200 C
201 C
202 C
203 C
204 C
205 C
206 C
207 C
208 C
209 C
210 C
211 C
212 C
213 C
214 C
215 C
216 C
217 C
218 C
219 C
220 C
221 C
222 C
223 C
224 C
225 C
226 C
227 C
228 C
229 C
230 C
231 C
232 C
233 C
234 C
235 C
236 C
237 C
238 C
239 C
240 C
241 C
242 C
243 C
244 C
245 C
246 C
247 C
248 C
249 C
250 C
251 C
252 C
253 C
254 C
255 C
256 C
257 C
258 C
259 C
260 C
261 C
262 C
263 C
264 C
265 C
266 C
267 C
268 C
269 C
270 C
271 C
272 C
273 C
274 C
275 C
276 C
277 C
278 C
279 C
280 C
281 C
282 C
283 C
284 C
285 C
286 C
287 C
288 C
289 C
290 C
291 C
292 C
293 C
294 C
295 C
296 C
297 C
298 C
299 C
300 C
301 C
302 C
303 C
304 C
305 C
306 C
307 C
308 C
309 C
310 C
311 C
312 C
313 C
314 C
315 C
316 C
317 C
318 C
319 C
320 C
321 C
322 C
323 C
324 C
325 C
326 C
327 C
328 C
329 C
330 C
331 C
332 C
333 C
334 C
335 C
336 C
337 C
338 C
339 C
340 C
341 C
342 C
343 C
344 C
345 C
346 C
347 C
348 C
349 C
350 C
351 C
352 C
353 C
354 C
355 C
356 C
357 C
358 C
359 C
360 C
361 C
362 C
363 C
364 C
365 C
366 C
367 C
368 C
369 C
370 C
371 C
372 C
373 C
374 C
375 C
376 C
377 C
378 C
379 C
380 C
381 C
382 C
383 C
384 C
385 C
386 C
387 C
388 C
389 C
390 C
391 C
392 C
393 C
394 C
395 C
396 C
397 C
398 C
399 C
400 C
401 C
402 C
403 C
404 C
405 C
406 C
407 C
408 C
409 C
410 C
411 C
412 C
413 C
414 C
415 C
416 C
417 C
418 C
419 C
420 C
421 C
422 C
423 C
424 C
425 C
426 C
427 C
428 C
429 C
430 C
431 C
432 C
433 C
434 C
435 C
436 C
437 C
438 C
439 C
440 C
441 C
442 C
443 C
444 C
445 C
446 C
447 C
448 C
449 C
450 C
451 C
452 C
453 C
454 C
455 C
456 C
457 C
458 C
459 C
460 C
461 C
462 C
463 C
464 C
465 C
466 C
467 C
468 C
469 C
470 C
471 C
472 C
473 C
474 C
475 C
476 C
477 C
478 C
479 C
480 C
481 C
482 C
483 C
484 C
485 C
486 C
487 C
488 C
489 C
490 C
491 C
492 C
493 C
494 C
495 C
496 C
497 C
498 C
499 C
500 C
501 C
502 C
503 C
504 C
505 C
506 C
507 C
508 C
509 C
510 C
511 C
512 C
513 C
514 C
515 C
516 C
517 C
518 C
519 C
520 C
521 C
522 C
523 C
524 C
525 C
526 C
527 C
528 C
529 C
530 C
531 C
532 C
533 C
534 C
535 C
536 C
537 C
538 C
539 C
540 C
541 C
542 C
543 C
544 C
545 C
546 C
547 C
548 C
549 C
550 C
551 C
552 C
553 C
554 C
555 C
556 C
557 C
558 C
559 C
560 C
561 C
562 C
563 C
564 C
565 C
566 C
567 C
568 C
569 C
570 C
571 C
572 C
573 C
574 C
575 C
576 C
577 C
578 C
579 C
580 C
581 C
582 C
583 C
584 C
585 C
586 C
587 C
588 C
589 C
590 C
591 C
592 C
593 C
594 C
595 C
596 C
597 C
598 C
599 C
600 C
601 C
602 C
603 C
604 C
605 C
606 C
607 C
608 C
609 C
610 C
611 C
612 C
613 C
614 C
615 C
616 C
617 C
618 C
619 C
620 C
621 C
622 C
623 C
624 C
625 C
626 C
627 C
628 C
629 C
630 C
631 C
632 C
633 C
634 C
635 C
636 C
637 C
638 C
639 C
640 C
641 C
642 C
643 C
644 C
645 C
646 C
647 C
648 C
649 C
650 C
651 C
652 C
653 C
654 C
655 C
656 C
657 C
658 C
659 C
660 C
661 C
662 C
663 C
664 C
665 C
666 C
667 C
668 C
669 C
670 C
671 C
672 C
673 C
674 C
675 C
676 C
677 C
678 C
679 C
680 C
681 C
682 C
683 C
684 C
685 C
686 C
687 C
688 C
689 C
690 C
691 C
692 C
693 C
694 C
695 C
696 C
697 C
698 C
699 C
700 C
701 C
702 C
703 C
704 C
705 C
706 C
707 C
708 C
709 C
710 C
711 C
712 C
713 C
714 C
715 C
716 C
717 C
718 C
719 C
720 C
721 C
722 C
723 C
724 C
725 C
726 C
727 C
728 C
729 C
730 C
731 C
732 C
733 C
734 C
735 C
736 C
737 C
738 C
739 C
740 C
741 C
742 C
743 C
744 C
745 C
746 C
747 C
748 C
749 C
750 C
751 C
752 C
753 C
754 C
755 C
756 C
757 C
758 C
759 C
760 C
761 C
762 C
763 C
764 C
765 C
766 C
767 C
768 C
769 C
770 C
771 C
772 C
773 C
774 C
775 C
776 C
777 C
778 C
779 C
780 C
781 C
782 C
783 C
784 C
785 C
786 C
787 C
788 C
789 C
790 C
791 C
792 C
793 C
794 C
795 C
796 C
797 C
798 C
799 C
800 C
801 C
802 C
803 C
804 C
805 C
806 C
807 C
808 C
809 C
810 C
811 C
812 C
813 C
814 C
815 C
816 C
817 C
818 C
819 C
820 C
821 C
822 C
823 C
824 C
825 C
826 C
827 C
828 C
829 C
830 C
831 C
832 C
833 C
834 C
835 C
836 C
837 C
838 C
839 C
840 C
841 C
842 C
843 C
844 C
845 C
846 C
847 C
848 C
849 C
850 C
851 C
852 C
853 C
854 C
855 C
856 C
857 C
858 C
859 C
860 C
861 C
862 C
863 C
864 C
865 C
866 C
867 C
868 C
869 C
870 C
871 C
872 C
873 C
874 C
875 C
876 C
877 C
878 C
879 C
880 C
881 C
882 C
883 C
884 C
885 C
886 C
887 C
888 C
889 C
890 C
891 C
892 C
893 C
894 C
895 C
896 C
897 C
898 C
899 C
900 C
901 C
902 C
903 C
904 C
905 C
906 C
907 C
908 C
909 C
910 C
911 C
912 C
913 C
914 C
915 C
916 C
917 C
918 C
919 C
920 C
921 C
922 C
923 C
924 C
925 C
926 C
927 C
928 C
929 C
930 C
931 C
932 C
933 C
934 C
935 C
936 C
937 C
938 C
939 C
940 C
941 C
942 C
943 C
944 C
945 C
946 C
947 C
948 C
949 C
950 C
951 C
952 C
953 C
954 C
955 C
956 C
957 C
958 C
959 C
960 C
961 C
962 C
963 C
964 C
965 C
966 C
967 C
968 C
969 C
970 C
971 C
972 C
973 C
974 C
975 C
976 C
977 C
978 C
979 C
980 C
981 C
982 C
983 C
984 C
985 C
986 C
987 C
988 C
989 C
990 C
991 C
992 C
993 C
994 C
995 C
996 C
997 C
998 C
999 C
1000 C
    
```

③—3

```

57 C
58 C
59 DIMENSION P(NHIST),TCNHIST)
60 C
61 T(1)=PSIMAX
62 T(2)=PSI
63 E=SBFSAT(PSI)
64 DEBPSI=SBFSMT(PSI)
65 RETURN
66 C
67 C
68 C
69 C
70 C
71 C
72 C
73 ***** JUDGE IF THE PROCESS IS DRYING OR WETTING *****
74 IF(PSI<=P(N+1)) 3010,10,4010
75 C
76 C
77 C
78 C
79 C
80 ***** PSI IS NOT INCREASING NOR DECREASING *****
81 IF(JDRMT) 4070,3080,3080
82 C
83 C
84 C
85 C
86 ***** OPERATION 1 *****
87 C
88 C
89 C
90 1010 P(SIMP(N+1))
91 IF(PSI<GT,PSIM) JDRMT=1
92 IF(PSI>LT,PSIM) JDRMT=-1
93 C
94 N=1
95 P(1)=PSIZER
96 T(1)=PSI
97 P(2)=PSI
98 E=SUBFW(PSI)
99 DEBPSI=SBFW(PSI)
100 RETURN
101 C
102 C
103 C
104 C
105 ***** OPERATION 2 *****
106 C
107 C
108 C
109 C
110 2010 P(SIMP(N+1))
111 IF(PSI<GT,PSIM) JDRMT=1
112 IF(PSI>LT,PSIM) JDRMT=-1
113 C
114 N=N+1
115
116 T(1)=PSIMAX
117 P(1)=PSIMAX
118 T(2)=PSI
119 E=SBFSAT(PSI)
120 DEBPSI=SBFSMT(PSI)
121 RETURN
122 C
123 C
124 C
125 C
126 ***** OPERATION 3 (DRYING) *****
127 C
128 C
129 C
130 3010 IF(T(1)-E0-PSIZER) GO TO 3020
131 IF(PSI>LE,T(N)) GO TO 3030
132 GO TO 3060
133 C
134 C
135 ***** OPERATION 3=1 *****
136 C
137 C
138 3020 N=N+1
139 T(1)=PSI
140 P(2)=PSI
141 GO TO 3080
142 C
143 C
144 ***** OPERATION 3=2 *****
145 C
146 3030 DO 3040 I=1,N
147 IF(PSI>LE,T(I)) GO TO 3050
148 CONTINUE
149 WRITE(6,310)
150 310 FORMAT(1H0,6X,4H****. ERROR AT EMA. DATA T IS INCOMPATIBLE.)
151 STOP
152 N=N+1
153 P(N+1)=PSI
154 GO TO 3080
155 C
156 C
157 ***** OPERATION 3=3 *****
158 C
159 C
160 3060 N=N+1
161 IF(N<LT,NHIST) GO TO 3070
162 WRITE(6,320)
163 320 FORMAT(1H0,6X,4H****. ERROR AT EMA. ARRAY P AND T ARE TOO *
164 *
165 * STOP *****
166 3070 T(N)=PSI
167 P(N+1)=PSI
168 C
169 C
170 C
171 C
172 ***** *****
173 C
174 ***** *****

```

③—2

③—4

```

175 C * * * * *
176 C * * * * *
177 C * * * * *
178 C * * * * *
179 C * * * * *
180 C * * * * *
181 C * * * * *
182 C * * * * *
183 C * * * * *
184 C * * * * *
185 C * * * * *
186 C * * * * *
187 C * * * * *
188 C * * * * *
189 C * * * * *
190 C * * * * *
191 C * * * * *
192 C * * * * *
193 C * * * * *
194 C * * * * *
195 C * * * * *
196 C * * * * *
197 C * * * * *
198 C * * * * *
199 C * * * * *
200 C * * * * *
201 C * * * * *
202 C * * * * *
203 C * * * * *
204 C * * * * *
205 C * * * * *
206 C * * * * *
207 C * * * * *
208 C * * * * *
209 C * * * * *
210 C * * * * *
211 C * * * * *
212 C * * * * *
213 C * * * * *
214 C * * * * *
215 C * * * * *
216 C * * * * *
217 C * * * * *
218 C * * * * *
219 C * * * * *
220 C * * * * *
221 C * * * * *
222 C * * * * *
223 C * * * * *
224 C * * * * *
225 C * * * * *
226 C * * * * *
227 C * * * * *
228 C * * * * *
229 C * * * * *
230 C * * * * *

```

③—5

```

231 C * * * * *
232 C * * * * *
233 C * * * * *
234 C * * * * *
235 C * * * * *
236 C * * * * *
237 C * * * * *
238 C * * * * *
239 C * * * * *
240 C * * * * *
241 C * * * * *
242 C * * * * *
243 C * * * * *
244 C * * * * *
245 C * * * * *
246 C * * * * *
247 C * * * * *
248 C * * * * *
249 C * * * * *
250 C * * * * *
251 C * * * * *
252 C * * * * *
253 C * * * * *
254 C * * * * *
255 C * * * * *
256 C * * * * *
257 C * * * * *
258 C * * * * *
259 C * * * * *
260 C * * * * *
261 C * * * * *
262 C * * * * *
263 C * * * * *
264 C * * * * *
265 C * * * * *
266 C * * * * *

```

不飽和土の土中水分ヒステリシスの計算アルゴリズム—大倉

\*\*\*\*\* DATA OF HYSTERESIS \*\*\*\*\*

PSIMAX = 0.  
 PSIZER = -91.69  
 EU = 0.36

\*\*\*\*\* INITIAL DATA \*\*\*\*\*

N = 1  
 P(1) = 0.  
 T(1) = 0.  
 JDRWT = 1

\*\*\*\*\* RESULT \*\*\*\*\*

PSI	PROCESS	E	DEDP51	(continued)	WET	0.3145	0.1180E+01
0.	WET	0.3600	0.	-5.00	DRY	0.3058	0.1675E+02
-5.00	DRY	0.3531	0.1445E+02	-10.00	DRY	0.2876	0.1641E+02
-10.00	DRY	0.3455	0.1380E+02	-15.00	DRY	0.2691	0.1607E+02
-15.00	DRY	0.3371	0.1318E+02	-20.00	DRY	0.2492	0.2212E+02
-20.00	DRY	0.3274	0.2049E+02	-25.00	DRY	0.2295	0.3346E+02
-25.00	DRY	0.3158	0.2619E+02	-30.00	DRY	0.2068	0.8437E+03
-30.00	DRY	0.2921	0.4062E+02	-35.00	WET	0.2684	0.1444E+02
-35.00	DRY	0.2715	0.4197E+02	-40.00	WET	0.2783	0.2877E+02
-40.00	DRY	0.2502	0.4400E+02	-45.00	WET	0.2952	0.4076E+02
-45.00	DRY	0.2283	0.4356E+02	-50.00	DRY	0.2873	0.1419E+02
-50.00	DRY	0.2063	0.4223E+02	-55.00	DRY	0.2804	0.1383E+02
-55.00	DRY	0.1849	0.4032E+02	-60.00	DRY	0.2731	0.1600E+02
-60.00	DRY	0.1642	0.3834E+02	-65.00	DRY	0.2595	0.3346E+02
-65.00	DRY	0.1446	0.3678E+02	-70.00	DRY	0.2423	0.3836E+02
-70.00	DRY	0.1258	0.3603E+02	-75.00	DRY	0.2244	0.3512E+02
-75.00	DRY	0.1076	0.3629E+02	-80.00	DRY	0.2061	0.3687E+02
-80.00	DRY	0.0896	0.2200E+03	-85.00	DRY	0.1877	0.3654E+02
-85.00	WET	0.0918	0.2568E+03	-90.00	DRY	0.1697	0.3544E+02
-90.00	WET	0.0932	0.3036E+03	-95.00	DRY	0.1523	0.3286E+03
-95.00	WET	0.0949	0.4450E+03	-100.00	WET	0.1538	0.4101E+03
-100.00	WET	0.0969	0.5553E+03	-105.00	WET	0.1556	0.5255E+03
-105.00	WET	0.0994	0.7116E+03	-110.00	WET	0.1610	0.6959E+03
-110.00	WET	0.1025	0.9424E+03	-115.00	WET	0.1651	0.9614E+03
-115.00	WET	0.1066	0.1302E+02	-120.00	WET	0.1709	0.1403E+02
-120.00	WET	0.1122	0.1900E+02	-125.00	WET	0.1797	0.2201E+02
-125.00	WET	0.1200	0.2980E+02	-130.00	WET	0.1942	0.3766E+02
-130.00	WET	0.1319	0.5100E+02	-135.00	WET	0.1904	0.7525E+03
-135.00	WET	0.1515	0.7301E+02	-140.00	DRY	0.1852	0.9927E+03
-140.00	WET	0.1699	0.9103E+03	-145.00	DRY	0.1801	0.1058E+02
-145.00	DRY	0.1670	0.9170E+03	-150.00	DRY	0.1747	0.1106E+02
-150.00	DRY	0.1625	0.1258E+02	-155.00	DRY		
-155.00	DRY	0.1558	0.1334E+02	-160.00	DRY		
-160.00	DRY	0.1493	0.1391E+02	-165.00	DRY		
-165.00	DRY	0.1354	0.1420E+02	-170.00	DRY		
-170.00	DRY	0.1425	0.4821E+03	-175.00	DRY		
-175.00	WET	0.1375	0.6661E+03	-180.00	DRY		
-180.00	WET	0.1404	0.9722E+03	-185.00	DRY		
-185.00	WET	0.1444	0.1525E+02	-190.00	DRY		
-190.00	WET	0.1505	0.2609E+02	-195.00	DRY		
-195.00	WET	0.1605	0.9278E+02	-200.00	DRY		
-200.00	WET	0.1864	0.1415E+01	-205.00	DRY		
-205.00	WET	0.2462		-210.00	DRY		

(to be continued)

④実行結果