不飽和土の土中水分ヒステリシスの計算アルゴリズム

著者	大倉 博
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	25
ページ	127-141
発行年	1981-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000843

556.14：556.332.342

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 θ and capillary potential ϕ 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

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

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

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

for wetting process and

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

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

<**Operation**> Examine new variation of ϕ upon following test. If $\phi\leqq\phi_{zero}$, where ϕ_{zero} is defined as value of ϕ at the drying cross point of θ_w and θ_d, then execute<Op. 1>. If $\phi_{zero}<\phi<\phi_{max}$, then execute <Op. 3> for wetting process and <Op. 4> for drying process. If $\phi\leqq\phi_{max}$, then execute <Op. 2>.

<**Op. 1**> Let $n\leftarrow1$, $P_1\leftarrow\phi_{zero}$, $T_1\rightarrow\phi_{zero}$ and $T_2\leftarrow\phi$, where "$\leftarrow$" means the operation substituting value of right side to variable of left side. Return to <Operation>.

<**Op. 2**> Let $n\leftarrow1$, $p_1\leftarrow\phi_{max}$, $T_1\leftarrow\phi_{max}$ and $T_2\leftarrow\phi$. Return to<Operation>.

<**Op. 3**> If $T_1=\phi_{zero}$, then execute <Op. 3-1>. If $T_1\neq\phi_{zero}$ and $\phi\leqq T_n$, then execute <Op. 3-2>. If $T_1\neq\phi_{zero}$ and $\phi>T_n$, then execute <Op. 3-3>. <**Op. 3-1**> Let $n\leftarrow1$, $T_1\leftarrow\phi$ and $P_2\leftarrow\phi$. Return to <Operation>. <**Op. 3-2**> Find the maximum value of i that satisfies $i\leqq n$ and $\phi\leqq T_i$, then let $n\leftarrow i$, $T_n\leftarrow\phi$ and $P_{n+1}\leftarrow\phi$. Return to <Operation>. <**Op. 3-3**>Let $n\leftarrow n+1$, $T_n\leftarrow\phi$ and $P_{n+1}\leftarrow\phi$. Return to <Operation>.

<**Op. 4**> If $\phi<P_n$, then execute <Op. 4-1>. If $P_n\leqq\phi<P_1$, then execute <Op. 4-2>. If $\phi\geqq P_1$, then execute <Op. 4-3>.

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

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

<**Op. 4-3**> Let $n\leftarrow1$, $P_1\leftarrow\phi$, $T_1\leftarrow\phi_{zero}$ and $P_2\leftarrow\phi$. 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ϕ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

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\nabla(K\nabla(\varphi)) \qquad \cdots\cdots(1)$$

または

$$\frac{\partial\theta}{\partial\phi}\cdot\frac{\partial\varphi}{\partial t}=\nabla(K\nabla(\varphi)) \qquad \cdots\cdots(2)$$

であらわされる．ここでtは時間，Kは透水係数，φは全ポテンシャル，ϕ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，θとϕとの関係式と，Kとϕ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θとϕ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θ_{max}とϕ_{max}の飽和状態から最小容水量θ_{min}とこれに対応する毛管ポテンシャルϕ_{min}まで減少するときのθ—ϕの経路は模式的に図1の曲線ABXであらわされる．次に，ϕが増加に転じ，ϕ_{min}からϕ_{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$\phi=\phi_{max}$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，ϕが減少に転じ，ϕ_{max}からϕ_{min}まで減少するときの経路はDEFBXであらわされる，このうち，BCJDとDEFB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$\theta=\theta_w(\phi)$と$\theta=\theta_d(\phi)$であらわす，$\theta_w(\phi)$と$\theta_d(\phi)$は曲線XBをもあらわし，XB上で$\theta=\theta_w=\theta_d(\phi)$とする．また，B点の$\phi$の値を$\phi_{zero}$とする．

ϕが図1のD点のϕ_{max}からϕ_Fまで減少した後ϕ_Gまで増加し，その後ϕ_Hまで減少しさらにϕ_Iまで増加するときの経路は図1のDEFGHIになる．また，ϕが図1のB点のϕ_{zero}からϕ_Jまで増加した後ϕ_Kまで減少し，その後ϕ_Lまで増加しさらにϕ_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．

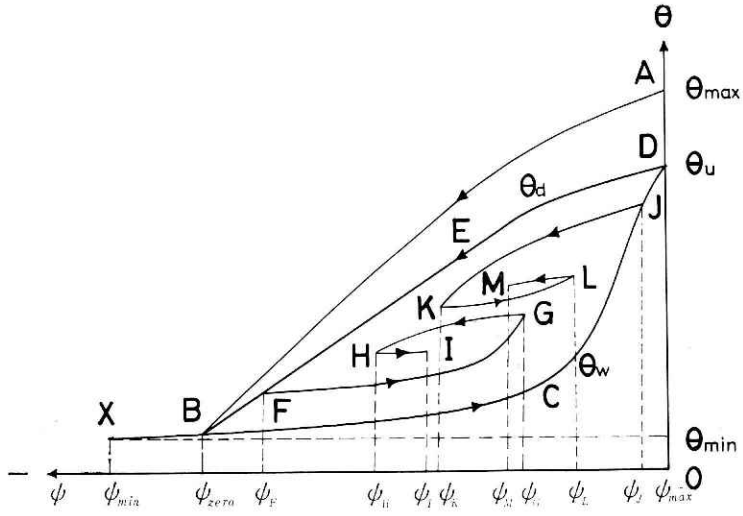


図 1 不飽和土の土中水分ヒステリシスの概念図
BCJD は主ループ吸水過程の曲線，DEFB は主ループ排水過程の曲線である．FG は初期吸水過程の走線，JK は初期排水過程の走査線である。HI と KL は吸水と排水を繰返した後の吸水過程の走査線，GH と LM は吸水と排水を繰返した後の排水過程の走査線である．

Fig. 1 Schematical 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 scanniug 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 Poulovassilis (1962)，Philip (1964)，Topp (1971)，Mualem(1974) 等によりなされている．Poulovassilis 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 θ と ϕ 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 θ と ϕ との関係 θ_w と θ_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 θ_w と θ_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ψとRは

$$R \propto 1/|\psi| \qquad \cdots\cdots(1)$$

の関係を持つ，細孔の開孔端の半径をr，細孔内の半径をρ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，ρ，Rを正規化する．

$$\bar{r} = \frac{r - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \qquad \cdots\cdots(2)$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \qquad \cdots\cdots(3)$$

$$\bar{R} = \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \qquad \cdots\cdots(4)$$

このとき，rとρ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．

ψ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．ψ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$\bar{R} \leqq \bar{\rho} \leqq \bar{R}+d\bar{R}$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，$\bar{R} \leqq \bar{r} \leqq 1$なる開孔半径を持つ細孔群の孔内半径が$\bar{R}-d\bar{R} \leqq \bar{\rho} \leqq \bar{R}$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

$$f(\bar{\rho}, \bar{r})\,d\bar{\rho}\,d\bar{r} \qquad \cdots\cdots(5)$$

である．

有効体積含水率（以下，有効含水率という）θ'を

$$\theta' = \theta - \theta_{\min} \qquad \cdots\cdots(6)$$

とすると，有効含水率は

$$\theta' = \iint_{\Omega} f(\bar{\rho}, \bar{r})\,\mathrm{d}\bar{\rho}\,\mathrm{d}\bar{r} \qquad \cdots\cdots(7)$$

となる．ここで，積分範囲Ωは領域図のハッチングされた領域である．

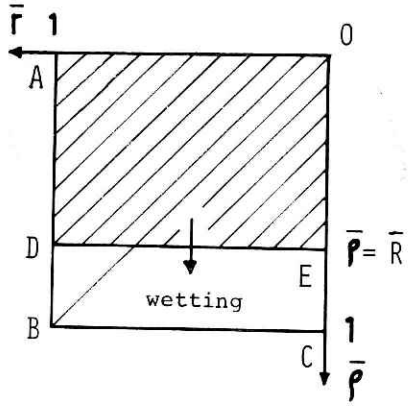


図 2　主ループ吸水過程の領域図
ハッチングで示される領域の細孔が水に満されている．吸水過程が経続するとき辺DEが下方に移動し，領域が拡大する。

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.

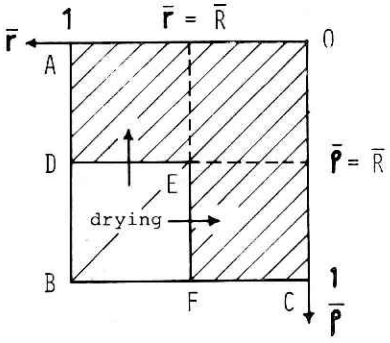


図 3　主ループ排水過程の領域図
ハッチングで示される領域の細孔が水に満されている．排水過程が経続するとき，辺DEが上方に，辺EFが右方に移動して領域が縮小する．このとき頂点Eは対角線BO上を移動する．

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. 1 Correspondence of ϕ_j with P_i or T_i, and N with n for main wetting process.

i	1	2
P_i	ϕ	ϕ
T_i	ϕ_{zero}	

$n=1$

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

i	1	2
P_i	ϕ_{max}	ϕ
T_i	ϕ	

$n=1$

$f(\bar{r},\ \bar{\rho})$が一変数関数 $h(\bar{r})$ と $l(\bar{\rho})$ の積

$$f(\bar{r},\ \bar{\rho})=h(\bar{r})l(\bar{\rho}) \qquad \cdots\cdots(8)$$

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

$$L(\bar{R})=\int_0^{\bar{R}} l(\bar{\rho})\,\mathrm{d}\bar{\rho} \qquad \cdots\cdots(9) \qquad\qquad H(\bar{R})=\int_0^{\bar{R}} h(\bar{r})\,\mathrm{d}\bar{r} \qquad \cdots\cdots(10)$$

と定義する．このとき主ループ吸水過程の有効含水率 θ'_w は図2から

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

となる．また，主ループ排水過程の有効含水率 θ'_d は図4から

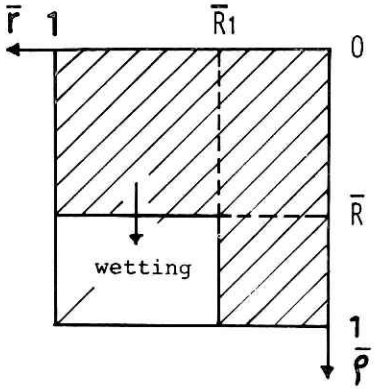


図 4　初期吸水過程に対する領域図
Fig. 4　The filled pore diagram in the $\bar{r}$, $\bar{\rho}$ plane for primary wetting scanning curve.

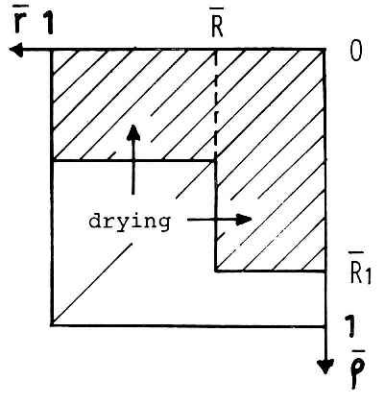


図 5　初期排水過程に対する領域図
Fig. 5　The filled pore diagram in the $\bar{r}$, $\bar{\rho}$ plane for primary drying scanning curve.

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

i	1	2
P_i	ϕ	ϕ
T_i	ϕ_{zero}	

$n=1$

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

i	1	2
P_i	ϕ_1	ϕ
T_i	ϕ	

$n=1$

$$\theta'_d(\bar{R})=L(\bar{R})\div[L(1)-L(\bar{R})]H(\bar{R}) \qquad \cdots\cdots(12)$$

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

$$L(\phi)=\theta'_w(\phi) \qquad \cdots\cdots(13)$$

$$H(\phi)=[\theta'_d(\phi)-\theta'_w(\phi)]/[\theta'_u-\theta'_w(\phi)] \qquad \cdots\cdots(14)$$

初期吸水過程の有効含水率は，図4の領域図から

$$\theta'\left(\begin{matrix}\phi_{max}\\ \phi_1\end{matrix}\ \phi\right)=L(\phi)+H(\phi_1)[L(\phi_{max})-L(\phi)]$$

$$=\theta'_w(\phi)+\frac{\theta'_u-\theta'_w(\phi)}{\theta'_u-\theta'_w(\phi)}[\theta'_d(\phi)-\theta'_w(\phi_1)] \qquad \cdots\cdots(15)$$

なると．ここで，左辺 $\theta'\left(\begin{matrix}\phi_{max}\\ \phi_1\end{matrix}\ \phi\right)$ は ϕ が ϕ_{max} から ϕ_1 まで減少したのち，ϕ 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

$$\theta'\left(\begin{matrix}\phi_1\\ \phi_{min}\end{matrix}\ \phi\right)=\theta'_w(\phi)+\frac{\theta'(\phi_1)-\theta'_w(\phi)}{\theta'_u-\theta'_w(\phi)}[\theta'_d(\phi)-\theta'_w(\phi)] \qquad \cdots\cdots(16)$$

となる．このとき，ϕ の経歴は ϕ_{min} から ϕ_1 まで増加した後 ϕ 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

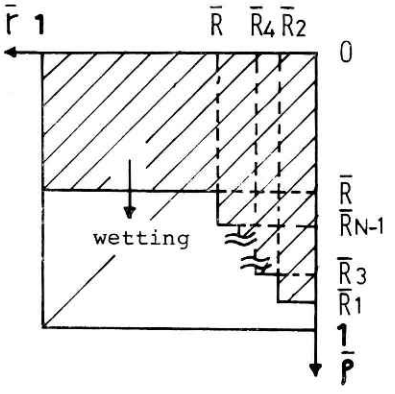


図 6 吸水と排水を繰返した後の吸水過程に対する領域図

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.

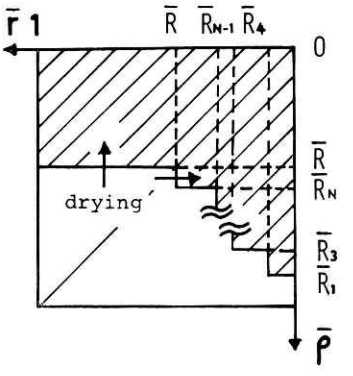


図 7 吸水と排水を繰返した後の排水過程に対する領域図

Fig. 7 The filled pore diagram in the $\bar{r}$, $\bar{\rho}$ plane for draying after a series of alternating process of drainage and imbibition.

Table. 5 Correspondence of ϕ_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	ϕ_1	ϕ_3	•	•	ϕ_{N-1}	ϕ
T_i	ϕ_2	ϕ_4	•	•	ϕ_N	

$n=N/2$

Table. 6 Correspondence of ϕ_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	ϕ_1	ϕ_3	•	•	ϕ_N	ϕ
T_i	ϕ_2	ϕ_4	•	•	ϕ	

$n=(N+1)/2$

$$\theta'\left(\begin{matrix}\phi_{\min} & \phi_1 & \phi_2 & \cdots & \phi_N & \phi\end{matrix}\right)=\theta'_w+\left[\theta'_w(\phi_{N-1})-\theta'_w(\phi)\right]\frac{\theta'_d(\phi_N)-\theta'_w(\phi_N)}{\theta'_u-\theta'_w(\phi_N)}$$
$$+\sum_{j=1}^{(N/2)-1}\left[\theta'_w(\phi_{2j-1})-\theta'_w(\phi_{2j+1})\right]\frac{\theta'_d(\phi_{2j})-\theta'_w(\phi_{2j})}{\theta'_u-\theta'_w(\phi_{2j})} \qquad \cdots\cdots(17)$$

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

$$\theta'\left(\begin{matrix}\phi_{\min} & \phi_1 & \phi_2 & \cdots & \phi_N & \phi\end{matrix}\right)=\theta'_w(\phi)+\left[\theta'_w(\phi_N)-\theta'_w(\phi)\right]\frac{\theta'_d(\phi)-\theta'_w(\phi)}{\theta'_u-\theta'_w(\phi)}$$
$$+\sum_{j=1}^{(N-1)/2}\left[\theta'_w(\phi_{2j-1})-\theta'_w(\phi_{2j+1})\right]\frac{\theta'_d(\phi_{2j})-\theta'_w(\phi_{2j})}{\theta'_u-\theta'_w(\phi_{2j})} \qquad \cdots\cdots(18)$$

になる.

計算アルゴリズム

(15), (16), (17), (18)式は有効含水率 θ', θ'_u, θ'_w, θ'_d をそれぞれ含水率 θ, θ_u, θ_w, θ_d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 φ_j と P_i と T_i, Nと n との対応関係を用いて φ_j を P_i と T_i に置き変えると

$$\theta(\psi)=\theta_w(P_{n+1})+\sum_{i=1}^{n}\{\theta_w(P_i)-\theta_w(P_{i+1})\}\frac{\theta_d(T_i)-\theta_w(T_i)}{\theta_u-\theta_w(T_i)} \qquad \cdots\cdots(19)$$

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θ_wと主ループ排水過程の曲線θ_dをもあらわせることがわかる．

$\partial\theta/\partial\varphi$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．

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

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial\psi}\right)_{\text{drying}}=\frac{\{\theta_u-\theta_w(P_n)\}\{\theta_u-\theta_d(T_n)\}}{\{\theta_u-\theta_w(T_n)\}^2}\cdot\frac{\partial\theta_w(P_{n+1})}{\partial\psi}$$

$$+\frac{\theta_w(P_n)-\theta_w(T_n)}{\theta_u-\theta_w(T_n)}\cdot\frac{\partial\theta_d(P_{n+1})}{\partial\psi} \qquad \cdots\cdots(21)$$

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，ψが$\psi_1\leqq\psi<\psi_{\max}$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φ_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ψの任意の変動に追随してψ_jとP_iとT_iとの対応を適宜修正すると，θは(19)式のみで，$\partial\theta/\partial\varphi$は(20)式または(21)式を用いて計算できる．

$\varphi\leqq\varphi_{\text{zero}}$なる$\varphi$に対して，$\theta_w$と$\theta_d$は等しくなるから，$T_i\leqq\varphi_{\text{zero}}$なる$T_i$に対し(19)の右辺第2項は零になる．$\theta_w(\psi)$と$\theta_c(\psi)$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$T_i\leqq\varphi_{\text{zero}}$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φ_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「←」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（新らしい計算ステップ）のψについて以下の検査を行う．$\psi\leqq\psi_{\text{zero}}$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．$\psi_{\max}\leqq\psi$を検査し，合格ならば＜操作2＞を実行する．

＜**操作1**＞　$n\leftarrow1$，$P_1\leftarrow\psi_{\text{zero}}$，$T_1\leftarrow\psi_{\text{zero}}$，$T_2\leftarrow\psi$とする．＜操作＞にもどる．

＜**操作2**＞　$n\rightarrow1$，$P_1\leftarrow\psi_{\max}$，$T_1\leftarrow\psi_{\max}$，$T_2\leftarrow\psi$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$\psi\leqq T_n$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**＞　$n\leftarrow1$，$T_1\leftarrow\psi$，$P_2\leftarrow\psi$とする．＜操作＞にもどる．

＜**操作3—2**＞　$\psi\leqq T_i$を満す最大の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＞　$n \leftarrow n \div 1$, $T_n \leftarrow \psi$, $P_{n+1} \leftarrow \psi$ とする. ＜操作＞にもどる.

＜操作4＞　$\psi < P_n$ を検査する. 合格ならば＜操作4—1＞を実行する. $P_n \leqq \psi < P_1$ を検査する, 合格ならば＜操作4—2＞を実行する. $\psi \geqq P_1$ を検査する, 合格ならば＜操作4—3＞を実行する.

＜操作4—1＞　$P_{n+1} \leftarrow \psi$ とする. ＜操作＞にもどる.

＜操作4—2＞　$i \leqq n$ かつ $\psi \geqq P_i$ なる最少の i を求め, $n \leftarrow i-1$, $P_{n+1} \leftarrow \psi$ とする. ＜操作＞にもどる.

＜操作4—3＞　$n \leftarrow 1$, $P_1 \leftarrow \psi$, $T_1 \leftarrow \psi_{zero}$, $P_1 \leftarrow \psi$ 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・θ と $\partial\theta/\partial\psi$ の計算結果を図8に示す. この計算において θ_w と θ_d などは,

$$\theta_w(\psi) = 0.13369 \tan(0.12148\psi \div 1.078) \div 0.2499827 \quad \cdots\cdots(22)$$

$$\theta_d(\psi) = \sqrt{0.00024\psi^2 \div 0.0081} \div 0.27 \qquad -30 < \psi < 0 \quad \cdots\cdots(23)$$

$$= 0.004\psi \div 0.4042 \div 0.00392731\{1-\cos(0.10185\psi \div 6.1917155)\}$$

$$-91.69 < \psi \leqq -30 \quad \cdots\cdots(24)$$

$\theta_u = 0.36$,　$\psi_{max} = 0$,　$\varphi_{zero} = -91.69$

φ の単位：cmH_2O

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 θ と $\partial\theta/\partial\psi$ の計算も行なう. ψ 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, ψ の直前の変動を以って判定する.

FUNCTION FEW 1 が θ_w と $\partial\theta_w/\partial\theta$ を与え, FUNCTION FED 1 が θ_d と $\partial\theta_d/\partial\psi$ を与える.

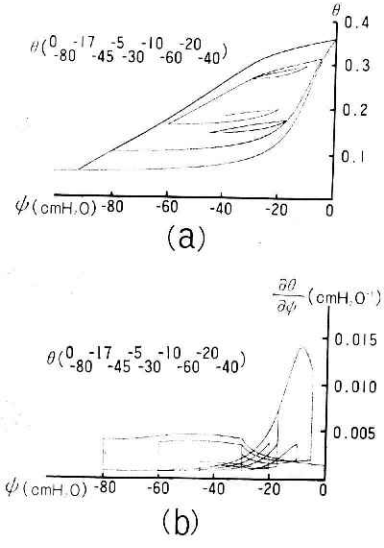


図 8　θ と $\partial\theta/\partial\psi$ のヒステリシス計算結果
Fig. 8　Calculated results.
$\theta-\psi$ relation of main wetting process (θ_w) and main doying process (θ_d) are
$\theta_w(\psi) = 0.13369 \tan(0.12148\psi + 1.078) + 0.24998427$
$\theta_d(\psi) = \sqrt{0.00024\psi^2 + 0.0081} + 0.27 \quad -30 < \psi \leqq 0$
$= 0.004\psi + 0.4042 + 0.00392731 \cdot \{1-\cos(0.10185\psi + 6.1017155)\}$
$-91.69 < \psi \leqq -30$
$= \theta_w(\psi) \quad \psi < -91.69$
(a) is calculated moisture content $\theta(\psi)$.
(b) is calculated derived moisture content $\partial\theta/\partial\psi$.

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) Poulovassilis, 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メインプログラム

```
C            ***** TEST PROGRAM OF SUBROUTINE EWA *****
C
C
C
C*************************************************************************
*                                                                       *
*                  ***** SYMBOLS IN THIS PROGRAM *****                  *
*                                                                       *
*  DEDPSI : DERIVED FUNCTION OF 'E' WITH HYSTERESIS.                    *
*                                                                       *
*  E      : VOLUMETRIC MOISTURE CONTENT WITH HYSTERESIS (THETA).        *
*                                                                       *
*  EU     : VALUE OF THETA AT THE SATURATING CROSS POIN OF 'FEW1'       *
*           AND 'FED1'.                                                 *
*                                                                       *
*  EWA    : SUBROUTINE CALCURATING HYSTERESIS PATH, 'E' AND 'DEDPSI'.   *
*                                                                       *
*  FED1   : FUNCTION OF THETA AT MAIN DRYING PROCESS.                   *
*                                                                       *
*  FEHD1  : DERIVED FUNCTION OF THETA AT MAIN DRYING PROCESS.           *
*                                                                       *
*  FEHW1  : DERIVED FUNCTION OF THETA AT MAIN WETTING PROCESS.          *
*                                                                       *
*  FEW1   : FUNCTION OF THETA AT MAIN WETTING PROCESS.                  *
*                                                                       *
*  FSAT1  : FUNCTION OF THETA AT SATURATION.                            *
*                                                                       *
*  FSHT1  : DERIVED FUNCTION OF THETA AT SATURATION.                    *
*                                                                       *
*  JCHAR  : JUDGEMENT OF WETTING OR DRYING BY CHARACTER.                *
*                                                                       *
*  JCHDRY : CHARACTER 'DRY'.                                            *
*                                                                       *
*  JCHWET : CHARACTER 'WET'.                                            *
*                                                                       *
*  JDRWT  : JUDGEMENT OF WETTING OR DRYING.                             *
*             JDRWT= 1 : WETTING.                                       *
*             JDRWT=-1 : DRYING.                                        *
*                                                                       *
*  LNPT   : DIMENSION LENGTH OF ARRAY 'P' AND 'T'.                      *
*                                                                       *
*  N      : ACTUALLY USED NUMBER OF 'P' AND 'T'.                        *
*                                                                       *
*  P      : BUFFER TO REMEMBER HYSTERESIS PATH.                         *
*                                                                       *
*  PSI    : CAPILLARY POTENTIAL.                                        *
*                                                                       *
*  PSIMAX : CAPILLARY POTENTIAL AT THE SATURATING CROSS POINT OF        *
*           'FEW1' AND 'FED1'.                                          *
*                                                                       *
*  PSIZER : CAPILLARY POTENTIAL AT THE DRYING CROSS POINT OF 'FEW1'     *
*           AND 'FED1'.                                                 *
*                                                                       *
*  T      : BUFFER TO REMEMBER HYSTERESIS PATH.                         *
*                                                                       *
*                                                                       *
*************************************************************************
C
C
C
      EXTERNAL FEW1,FEHW1,FED1,FEHD1,FSAT1,FSHT1
C
      DIMENSION P(10),T(10)
C
      DATA LNPT /10/
      DATA JCHDRY,JCHWET /3HDRY,3HWET/
C
C
      WRITE(6,100)
  100 FORMAT(1H1///1H0)
C
C
C     ***** READ PSI MAX, PSI MIN AND THETA U (EU) *****
C
      READ(5,210) PSIMAX
  210 FORMAT(10E8.0)
      READ(5,210) PSIZER
      READ(5,210) EU
C
      WRITE(6,220)
  220 FORMAT(1H ,6X,30H***** DATA OF HYSTERESIS *****/1H )
      WRITE(6,230) PSIMAX
  230 FORMAT(1H ,8X,8HPSIMAX= ,F6.2)
      WRITE(6,240) PSIZER
  240 FORMAT(1H ,8X,8HPSIZER= ,F6.2)
      WRITE(6,250) EU
  250 FORMAT(1H ,8X,4HEU    = ,F6.2)
C
C
C     ***** READ INITIAL VALUE OF N, P(I), T(I) AND JDRWT *****
C
      READ(5,310) N
  310 FORMAT(10I8)
      IF(N.LE.LNPT) GO TO 3010
      WRITE(6,320) N
  320 FORMAT(1HC,6X,41H***** ERROR AT MAIN.  N IS TOO LARGE (N=,I3,
     1       8H). *****)
      STOP
 3010 READ(5,330) (P(I),I=1,N)
  330 FORMAT(10E8.0)
      READ(5,330) (T(I),I=1,N)
      READ(5,310) JDRWT
C
      WRITE(6,340)
  340 FORMAT(1HO,6X,24H***** INITIAL DATA *****/1H )
      WRITE(6,350) N
  350 FORMAT(1H ,8X,4HN      = ,I3)
      WRITE(6,360) (P(I),I=1,N)
  360 FORMAT(1H ,8X,4HP(I)   = ,10(F5.2,2X))
      WRITE(6,370) (T(I),I=1,N)
  370 FORMAT(1H ,8X,4HT(I)   = ,10(F5.2,2X))
      WRITE(6,380) JDRWT
  380 FORMAT(1H ,8X,6HJDRWT = ,I3)
C
C
C     ***** CALCULATION OF THETA AND ROUND THETA ROUND PSI *****
C
      WRITE(6,400)
  400 FORMAT(///1HO,6X,18H***** RESULT *****
     1       //1HO,11X,3HPSI,3X,7HPROCESS,12X,1HE,15X,6HDEDPSI)
C
 4010 READ(5,410,END=9010) PS
  410 FORMAT(F8.2)
      CALL EWA(PSI,PSIMAX,PSIZER,N,P,T,LNPT,JDRWT,EU,FEW1,FEHW1,
     1         FED1,FEHD1,FSAT1,FSHT1,E,DEDPSI)
      JCHAR=JCHDRY
      IF(JDRWT.EQ.1) JCHAR=JCHWET
      WRITE(6,420) PSI,JCHAR,E,DEDPSI
  420 FORMAT(1H ,8X,F6.2,7X,A3,7X,F7.4,7X,E12.4)
      GO TO 4010
C
C
 9010 STOP
C
      END
```

②

ファンクション

FED1,
FEW1,
FSAT1

```
      FUNCTION FED1(PSI)
C
      DATA A1,B1,C1 /0.00024,0.0081,0.27/
      DATA A12 /0.00012/
      DATA A2,B2 /0.004,0.4121/
      DATA A3,B3,C3 /0.00392731,0.10185,0.1917155/
C
C
      IF(PSI.LE.-30.) GO TO 1010
      XX=A1+PSI+B1
      FED1=SQRT(XX)+C1
      RETURN
 1010 FED1=A2+PSI+B2+A3+(1.-COS(B3+PSI+C3))
      FED1=FED1-0.0079
      RETURN
C
C
      ENTRY FEHD1(PSI)
C
      IF(PSI.LE.-30.) GO TO 2010
      XX=A1+PSI+B1
      FED1=A12/SQRT(XX)
      RETURN
 2010 FED1=A2
      FED1=A2+A3+B3+SIN(B3+PSI+C3)
      RETURN
C
C
      END
```

```
      FUNCTION FEW1(PSI)
C
      DATA A /0.13369/
      DATA B /0.2499842742/
      DATA ALPHA /0.12148/
      DATA BETA /1.0780/
C
      DATA AB /0.01624066612/
C
C
      XX=ALPHA+PSI+BETA
      FEW1=A+DATAN(XX)+B
C
      RETURN
C
      ENTRY FEHW1(PSI)
C
      XX=ALPHA+PSI+BETA
      XX=1.+XX+XX
      FEW1=AB/XX
C
      RETURN
C
C
      END
```

```
      FUNCTION FSAT1(PSI)
C
      FSAT1=0.36
      RETURN
C
      ENTRY FSHT1(PSI)
C
      FSAT1=0.
      RETURN
C
      END
```

③サブルーチンEWA

③—1

```
      SUBROUTINE EWA(PSI,PSIMAX,PSIZER,N,P,T,NHIST,JDRWT,EU,SUBFEW,
     1               SBFEHW,SUBFED,SBFEHD,SBFSAT,SBFSHT,E,DEDPSI)
C
C
C
C*****************************************************************
*                                                                *
*                                                                *
*              ***** SYMBOLS IN THIS PROGRAM *****               *
*                                                                *
*                                                                *
*  DEDPSI : DERIVED FUNCTION OF 'E' WITH HYSTERESIS.             *
*                                                                *
*  E      : VOLUMETRIC MOISTURE CONTENT WITH HYSTERESIS (THETA). *
*                                                                *
*  EU     : VALUE OF THETA AT THE SATURATING CROSS POIN OF 'SUBFEW'*
*           AND 'SUBFED'                                         *
*                                                                *
*  JDRWT  : JUDGEMENT OF WETTING OR DRYING.                      *
*             JDRWT= 1 : WETTING,                                *
*             JDRWT=-1 : DRYING.                                 *
*                                                                *
*  N      : ACTUALLY USED NUMBER OF 'P' AND 'T'.                 *
*                                                                *
*  NHIST  : DIMENSION LENGTH OF ARRAY 'P' AND 'T',               *
*                                                                *
*  P      : BUFFER TO REMEMBER HYSTERESIS PATH.                  *
*                                                                *
*  PSI    : CAPILLARY POTENTIAL.                                 *
*                                                                *
*  PSIM   : LAST VALUE OF 'PSI'.                                 *
*                                                                *
*  PSIMAX : CAPILLARY POTENTIAL AT THE SATURATING CROSS POINT OF *
*           'SUBFEW' AND 'SUBFED'.                               *
*                                                                *
*  PSIZER : CAPILLARY POTENTIAL AT THE DRYING CROSS POINT OF 'SUBFEW'*
*           AND 'SUBFED'                                         *
*                                                                *
*  SBFEHD : DERIVED FUNCTION OF THETA AT MAIN DRYING PROCESS.    *
*                                                                *
*  SBFEHW : DERIVED FUNCTION OF THETA AT MAIN WETTING PROCESS.   *
*                                                                *
*  SBFSAT : FUNCTION OF THETA AT SATURATION.                     *
*                                                                *
*  SBFSHT : DERIVED FUNCTION OF THETA AT SATURATION.             *
*                                                                *
*  SUBFED : FUNCTION OF THETA AT MAIN DRYING PROCESS.            *
*                                                                *
*  SUBFEW : FUNCTION OF THETA AT MAIN WETTING PROCESS.           *
*                                                                *
*  T      : BUFFER TO REMEMBER HYSTERESIS PATH.                  *
*                                                                *
*                                                                *
*****************************************************************
C
```

③—2

```
      C
      C
            DIMENSION P(NHIST),T(NHIST)
      C
      C
      C
      C     ************
      C     *          *
      C     * OPERATION *
      C     *          *
      C     ************
      C
            IF(PSI.LE.PSIZER) GO TO 1010
            IF(PSIMAX.LE.PSI) GO TO 2010
      C
      C
      C     ***** JUDGE IF THE PROCESS IS DRYING OR WETTING *****
      C
            IF(PSI-P(N+1)) 3010,10,4010
      C
      C
      C     ***** PSI IS NOT INCREASING NOR DECREASING *****
      C
         10 IF(JDRWT) 4070,3080,3080
      C
      C
      C
      C     ***************
      C     *             *
      C     * OPERATION 1 *
      C     *             *
      C     ***************
      C
      1010 PSIM=P(N+1)
            IF(PSI.GT.PSIM) JDRWT=1
            IF(PSI.LT.PSIM) JDRWT=-1
      C
            N=1
            P(1)=PSIZER
            T(1)=PSIZER
            P(2)=PSI
            E=SUBFEW(PSI)
            DEDPSI=SBFEHW(PSI)
            RETURN
      C
      C
      C
      C     ***************
      C     *             *
      C     * OPERATION 2 *
      C     *             *
      C     ***************
      C
      2010 PSIM=P(N+1)
            IF(PSI.GT.PSIM) JDRWT=1
            IF(PSI.LT.PSIM) JDRWT=-1
      C
            N=1
```


③—3

```
            T(1)=PSIMAX
            P(1)=PSIMAX
            T(2)=PSI
            E=SBFSAT(PSI)
            DEDPSI=SBFSHT(PSI)
            RETURN
      C
      C
      C
      C     ************************
      C     *                      *
      C     * OPERATION 3 (DRYING) *
      C     *                      *
      C     ************************
      C
      3010 IF(T(1).EQ.PSIZER) GO TO 3020
            IF(PSI.LE.T(N)) GO TO 3030
            GO TO 3060
      C
      C
      C     ***** OPERATION 3-1 *****
      C
      3020 N=1
            T(1)=PSI
            P(2)=PSI
            GO TO 3080
      C
      C
      C     ***** OPERATION 3-2 *****
      C
      3030 DO 3040 I=1,N
            IF(PSI.LE.T(I)) GO TO 3050
      3040 CONTINUE
            WRITE(6,310)
       310 FORMAT(1HO,6X,44H***** ERROR AT EWA.  DATA T IS INCOMPATIBLE.)
            STOP
      3050 N=I
            T(N)=PSI
            P(N+1)=PSI
            GO TO 3080
      C
      C
      C     ***** OPERATION 3-3 *****
      C
      3060 N=N+1
            IF(N.LT.NHIST) GO TO 3070
            WRITE(6,320)
       320 FORMAT(1HO,6X,43H***** ERROR AT EWA.  ARRAY P AND T ARE TOO ,
           1       6HSHORT.)
            STOP
      3070 T(N)=PSI
            P(N+1)=PSI
      C
      C
      C
      C     ***************************************************
      C     *                                                 *
```

③— 4

```
C     * CALCULATION OF ROUND THETA ROUND PSI FOR OPERATION 3 *
C     *                                                      *
C     ********************************************************
C
 3080 EDT=SUBFED(T(N))
      EWP=SUBFEW(P(N))
      EWT=SUBFEW(T(N))
      DEDHW=SBFEHW(P(N+1))
      DEDHD=SBFEHD(P(N+1))
      EUEWT=EU-EWT
      TERM1=(EU-EWP)*(EU-EDT)/(EUEWT*EUEWT)
      TERM2=(EWP-EWT)/EUEWT
      DEDPSI=TERM1*DEDHW+TERM2*DEDHD
C
      JDRWT=-1
C
      GO TO 5010
C
C
C     ************************
C     *                      *
C     * OPERATION 4 (WETTING) *
C     *                      *
C     ************************
C
 4010 IF(PSI.LT.P(N)) GO TO 4020
      IF(PSI.LT.P(1)) GO TO 4030
      GO TO 4060
C
C
C     ***** OPERATION 4-1 *****
C
 4020 P(N+1)=PSI
      GO TO 4070
C
C
C     ***** OPERATION 4-2 *****
C
 4030 DO 4040 I=1,N
      IF(P(I).LT.PSI) GO TO 4050
 4040 CONTINUE
      WRITE(6,410)
  410 FORMAT(1HO,6X,44H***** ERROR AT EWA.  DATA P IS INCOMPATIBLE.)
      STOP
 4050 N=I-1
      P(N+1)=PSI
      GO TO 4070
C
C
C     ***** OPERATION 4-3 *****
C
 4060 N=1
      P(1)=PSI
      T(1)=PSIZER
      P(2)=PSI
C
C
```

③— 5

```
C     ********************************************************
C     *                                                      *
C     * CALCULATION OF ROUND THETA ROUND PSI FOR OPERATION 4 *
C     *                                                      *
C     ********************************************************
C
 4070 EDT=SUBFED(T(N))
      EWT=SUBFEW(T(N))
      DEDHW=SBFEHW(P(N+1))
      DEDPSI=((EU-EDT)/(EU-EWT))*DEDHW
C
      JDRWT=1
C
C
C
C     ************************************************
C     *                                              *
C     * CALCULATION OF THETA FOR OPERATION 3 AND 4 *
C     *                                              *
C     ************************************************
C
 5010 E=0.
      EWP1=SUBFEW(P(1))
      DO 5020 I=1,N
      EWP=EWP1
      EWP1=SUBFEW(P(I+1))
      EDT=SUBFED(T(I))
      EWT=SUBFEW(T(I))
      E=E+(EWP-EWP1)*(EDT-EWT)/(EU-EWT)
 5020 CONTINUE
      E=E+EWP1
      RETURN
C
C
C
      END
```

④実行結果

```
***** DATA OF HYSTERESIS *****

  PSIMAX=   0.
  PSIZER= -91.69
  EU    =   0.36

***** INITIAL DATA *****

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


***** RESULT *****

     PSI   PROCESS          E            DEDPSI
      0.       WET      0.3600          0.
    -5.00      DRY      0.3531       0.1445E-02
   -10.00      DRY      0.3455       0.1589E-02
   -15.00      DRY      0.3371       0.1789E-02
   -20.00      DRY      0.3274       0.2089E-02
   -25.00      DRY      0.3158       0.2619E-02
   -30.00      DRY      0.2921       0.4002E-02
   -35.00      DRY      0.2715       0.4197E-02
   -40.00      DRY      0.2502       0.4342E-02
   -45.00      DRY      0.2283       0.4400E-02
   -50.00      DRY      0.2063       0.4356E-02
   -55.00      DRY      0.1849       0.4223E-02
   -60.00      DRY      0.1642       0.4032E-02
   -65.00      DRY      0.1446       0.3834E-02
   -70.00      DRY      0.1258       0.3678E-02
   -75.00      DRY      0.1076       0.3603E-02
   -80.00      DRY      0.0896       0.3629E-02
   -75.00      WET      0.0906       0.2200E-03
   -70.00      WET      0.0918       0.2568E-03
   -65.00      WET      0.0932       0.3036E-03
   -60.00      WET      0.0949       0.3643E-03
   -55.00      WET      0.0969       0.4450E-03
   -50.00      WET      0.0994       0.5553E-03
   -45.00      WET      0.1025       0.7116E-03
   -40.00      WET      0.1066       0.9424E-03
   -35.00      WET      0.1122       0.1302E-02
   -30.00      WET      0.1200       0.1900E-02
   -25.00      WET      0.1319       0.2980E-02
   -20.00      WET      0.1515       0.5100E-02
   -17.00      WET      0.1699       0.7301E-02
   -20.00      DRY      0.1670       0.9103E-03
   -25.00      DRY      0.1625       0.9170E-03
   -30.00      DRY      0.1558       0.1258E-02
   -35.00      DRY      0.1493       0.1334E-02
   -40.00      DRY      0.1425       0.1391E-02
   -45.00      DRY      0.1354       0.1420E-02
   -40.00      WET      0.1375       0.4821E-03
   -35.00      WET      0.1404       0.6661E-03
   -30.00      WET      0.1444       0.9722E-03
   -25.00      WET      0.1505       0.1525E-02
   -20.00      WET      0.1605       0.2609E-02
   -15.00      WET      0.1864       0.9278E-02
   -10.00      WET      0.2462       0.1415E-01
                    (to be continued)

                    (continued)
    -5.00      WET      0.3145       0.1180E-01
   -10.00      DRY      0.3058       0.1675E-02
   -15.00      DRY      0.2976       0.1641E-02
   -20.00      DRY      0.2891       0.1807E-02
   -25.00      DRY      0.2792       0.2212E-02
   -30.00      DRY      0.2595       0.3346E-02
   -25.00      WET      0.2628       0.8437E-03
   -20.00      WET      0.2684       0.1444E-02
   -15.00      WET      0.2783       0.2627E-02
   -10.00      WET      0.2952       0.4007E-02
   -15.00      DRY      0.2873       0.1419E-02
   -20.00      DRY      0.2804       0.1383E-02
   -25.00      DRY      0.2731       0.1600E-02
   -30.00      DRY      0.2595       0.3346E-02
   -35.00      DRY      0.2423       0.3512E-02
   -40.00      DRY      0.2244       0.3636E-02
   -45.00      DRY      0.2061       0.3687E-02
   -50.00      DRY      0.1877       0.3654E-02
   -55.00      DRY      0.1697       0.3544E-02
   -60.00      DRY      0.1523       0.3387E-02
   -55.00      WET      0.1538       0.3286E-03
   -50.00      WET      0.1556       0.4101E-03
   -45.00      WET      0.1580       0.5255E-03
   -40.00      WET      0.1610       0.6959E-03
   -35.00      WET      0.1651       0.9614E-03
   -30.00      WET      0.1709       0.1403E-02
   -25.00      WET      0.1797       0.2201E-02
   -20.00      WET      0.1942       0.3766E-02
   -25.00      DRY      0.1904       0.7525E-03
   -30.00      DRY      0.1852       0.9927E-03
   -35.00      DRY      0.1801       0.1058E-02
   -40.00      DRY      0.1747       0.1106E-02
```