シンポジウム

土とくに砂質の土の保水の構造

中　野　政　詩*

はじめに

pF 8 程度の水は土粒子の表面に単分子層で吸着されている。pF 5.2～4.2 程度の水は数分子層で同じく土粒子表面に吸着されている。この程度までの水は物理吸着の水といわれるもので，土粒子と水分子，水分子と水分子など分子間力によって土に保持されている。これより小さい pF 値を示す水は土粒子のつくる間隙をうめている。それは毛管力によって保持されている[1]。ところで，前者の水は土の比表面を知れば単位体積の土について容易に量で表わされる[2]。土の比表面は土を特徴づける基本的指標の一つであると考えてやれば，この程度のところで低水分の際の土の保水の構造がわかったといっても差支えはあるまい。ところが，後者の水を対象とする際には，いまのところ，これと同じ調子にはゆかない。間隙をうめている水の量を算出するために使いうる土を特徴づける基本的指標が確立されていないからである。筆者は間隙の確率密度関数がこの基本的指標に当たると考えている[3]。この報告は，この間隙の確率密度関数を明らかにし，この水の量の計算の手法を述べるものである。後者の水を対象とする際，この全体をもてば，土の保水の構造が説明されたことになりはしないだろうか。

1　連続する間隙の離散的な把え方

間隙は，土粒子でいわれるように1つ1つなど個々離散的に存在するものであるかのような印象を与える言葉で述べられるには不適当なものである。だいたいが，土のどこへにも連続して連結していくものであろう。このような間隙に確率密度関数を指定するには，まず間隙を片端しから千切って，丸めるなり角を作るなり整えて，1つ1つと数えられるようなものに作り変える必要がある。従来のパイプとかセルとかの間隙の表示はこういう操作に従ったものといってよい。パイプやセルを云々するとき，土のもう1つの成分の固相はどう扱っているのだろう。土の粒子を考えて生まれたセルを除いては，それについてはあまり聞かない。

* 東京大学農学部

土に間隙があると知るときは当然土に固相があると承知のはずである。そこで，片方だけでなく，間隙と固相共に理解出来るようなやり方で，ここでは間隙をみてみたい。それには，土を微小な要素に千切ることを考えてやればよい。その微小要素の1つ1つが間隙を所有するというイメージにその結果はなるだろう。これでも，必然的に間隙は千切られているから，ここに間隙の確率密度関数の指定は可能である。こうすれば，間隙の確率密度関数を考えることは固相のそれを考えることに通じよう。前者を指定したことは後者を指定したことになろう。間隙の性格を明らかにすれば，それは土の構造を明らかにしたことになろう。土の構造の指標の1つに“土の三相”がある。この指標をセミミクロの次元で使ってみようというこれは提案といってよい。

2　土の微小要素中の間隙とそこでの水

従来のパイプとかセルとかは千切った間隙を整えたものと前に言った。土の微小要素で，土の三相を考えて，今後間隙を扱ってゆくとき，この整え方は，土の間隙を水がうめてそこに水が保たれる機構に関与する因子が微小要素に与えられてさえいればよいという立場で次のようになる。すなわち，間隙は水をその全てにうめる，その一部にうめる，全くうめない，この三種の状態のいずれかの状態をとると考えてみる。どの状態をとるかは，微小要素が特徴的にもつであろう最大の間隙径と最小の間隙径とによってきめられると考えてみる。中間の大きさの間隙径は最大の間隙径と最小の間隙径とを関係づける1つの関係式できめてみる。微小要素中の間隙量は間隙径を径とする微小厚さの円板の和で与えてみる。間隙中にある水の量はその水が占める間隙の間隙径を径とする微小厚さの円板の和で与えてみる。ここまでのような間隙の整え方は，従来のものとくらべて大同小異というべきものである。

ところで，従来拡がったり縮まったりしながら連続して連結する間隙を千切るとき，その切断場所は拡がった所だろうか縮まった所なのだろうか。パイプに整える試みの場合，パイプが透水の研究との関連でイメージされ

たことを想い起こせば，それは縮まった所であろう。セルの場合，球粒子によってそれが生まれるとすれば，さしづめ縮まった所であろう。あってもよかったであろうに，拡がった所で千切った間隙というイメージは従来あまり使われていない。間隙の拡がりと縮まり，これは保水にたいして何か重要な役割を果しているにちがいない。微小要素の間隙にこの側面をとり入れてみる。微小要素の最大間隙と最小間隙，このいずれが間隙を水でうめる際に専行する支配権をもつのか。これは5分5分であるとしよう。そうすると，間隙の量ではまったく等しい大きさをもつが，水にたいする専行する支配権が最大間隙にある微小要素と最小間隙にある微小要素が必らず対になって土には存在すると考えるのが適当である。前者をX型の間隙，後者をO型の間隙と名付ける。こうすると，間隙と水とのかかわりあいを前よりもつめて次のように指定してみることが出来る。脱水過程では，X型の間隙は確かに前に述べた三つの状態のどれをもとりうる。しかし，O型の間隙はその全てに水をうめるか全くうめないかどちらかの状態のみとりうる。吸水過程の場合には，X型とO型とにおける事情がまったく逆転する。この考え方は，太い細いが滑らかにつながるパイプの毛管降下および上昇の現象から類推して一部は理解されようが，まったくの仮設としてしか理解されにくい部分も含むようである。こうして整えた間隙は図で示せばFig. 1, 2のようなものになる。

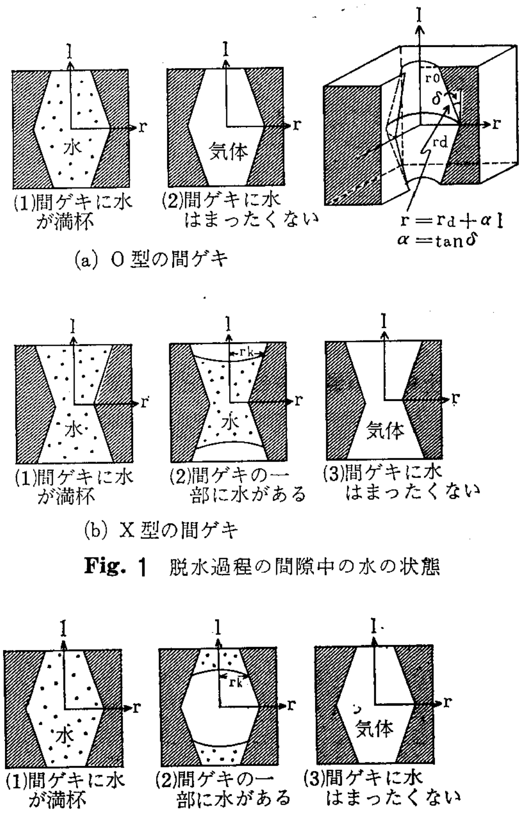


Fig. 1　脱水過程の間隙中の水の状態

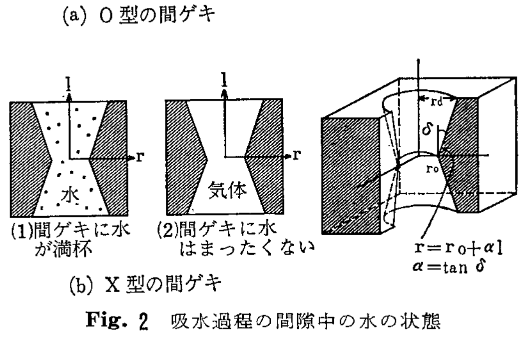


Fig. 2　吸水過程の間隙中の水の状態

3　微小要素の誕生と間隙の確率密度関数

千切り方に話をうつそう。間隙をパイプに千切る場合，これはラプラス式（$h=0.15/r$，h はサクション，r はパイプ半径）による。セルの場合，それはネックでおこなう。前者では間隙が水をもつ作用を利用し，後者では土粒子の空間での配置が描き出す図形を利用する。いずれにしても道具を使う因果的な千切り方である。土を千切るための道具はなにか。なにもない。単位の土を同じ大きさで N 個に千切ったとしよう。V_1 という間隙量をもつ微小要素が N_1 個，V_2 という間隙量をもつ微小要素が N_2 個，以下同順に V_n，N_n になるだろうと想定出来る。水分量でも間隙量でも，測定値は単位の土で得られるものが実際的に意味があって，微小要素で得られるものにはそれほどの意味は置けない。微小要素で得られるものは N 個について加え合わされてはじめて意味をもつ。この考えは，任意の間隙量 V_i をもつ微小要素が占める位置をあえて因果的に問うことは不要であって，N個の微小要素の種別の数さえわかればよいことを示してくれる。他方，測定値を得るに使った単位の土は，たまたまそのために，より大きい土から千切り取られたものと考えることが出来る。

さて，N 個の微小要素で V_1 を N_1 に，V_2 を N_2 に，以下同順に V_n を N_n に置く置き方の数 W は

$$W=\frac{N!}{N_1!\cdot N_2!\cdots\cdots N_n!} \tag{1}$$

で与えられることをまず知ろう。そのうえで，間隙量を同じくし，含む微小要素の個数を同じくすると考えられる単位の土を集めてみよう。この集まりでは，例えば，V_i をもつ微小要素が占める場所はちがうが，$N_1, N_2, \cdots\cdots N_n$ の数をまったく同じくするものがいくつか出来ていると想定出来る。前にのべた考え方にのると，このい

くつかの単位の土は，間隙量や水分量を考える限りでは，同価値のものと考えることが出来る。１つの単位の土を V_1 を N_1 に，V_2 を N_2 に，以下同順で V_n を N_n に配置する１つの配置の仕方に対応させてみれば，W を最大にする $(N_1, N_2 \cdots\cdots N_n)$ が測定値を得るために使った土における微小要素の内訳になるだろう。無数の単位の土のうちの $(N_1, N_2 \cdots\cdots N_n)$ を同じくする最も数多いもののうちから，測定値を得るための単位の土がとり出されていると考えられるからである。土を千切るための道具は見当らないが，土を千切るためのこのような確率的な考え方はありうるのではないだろうか。

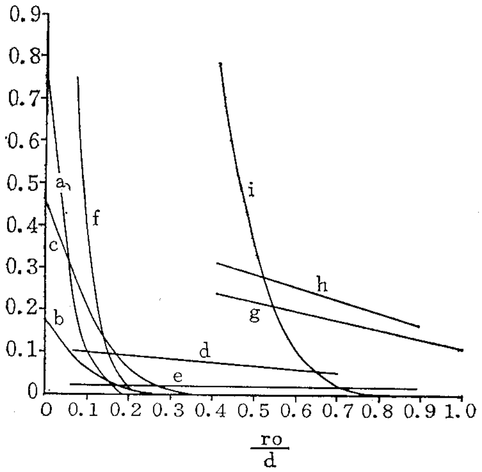
対数をとって，未定乗数法を使って，W を最大にする $(N_1, N_2 \cdots\cdots N_n)$ は計算出来る。この結果は V_i を確率変数とする確率密度関数を与える。前に，間隙量はある種の整え方を施してもち込んだ間隙径で表わそうではないかと述べた。これに従えば，この確率密度関数は間隙半径を確率変数とするものに書きかえることが出来る。すなわち，

$$f = A \cdot \exp\left\{-K\left(\frac{r_o}{d} + \frac{\alpha}{2}\right)^2\right\} \tag{2}$$

ここで，f: 相対度数，r_o: 最小の間隙半径，d: 微小要素のサイズ，α: 土に固有の定数。ただし，

$$K = 2\pi\beta d^3 \tag{3}$$

$$A = A\ (k, \alpha, \nu) \tag{4}$$



(a)	K＝50.0	$\nu=1\times10^{-4}$	$\alpha=0.3$
(b)	K＝50.0	$\nu=1\times10^{-4}$	$\alpha=0.1$
(c)	K＝20.0	$\nu=1\times10^{-4}$	$\alpha=0.3$
(d)	K＝ 1.0	$\nu=0.06$	$\alpha=0.3$
(e)	K＝ 1.0	$\nu=0.06$	$\alpha=0.1$
(f)	K＝50.0	$\nu=0.06$	$\alpha=0.3$
(g)	K＝ 1.0	$\nu=0.4$	$\alpha=0.01$
(h)	K＝ 1.0	$\nu=0.4$	$\alpha=0.1$
(i)	K＝10.0	$\nu=0.4$	$\alpha=0.1$

Fig. 3 確率密度関数 f

ここで，β と ν はそれぞれ土に固有の定数。Fig. 3 に f を図示してみる。

4 毛管力と水分量

間隙をうめる水は毛管力で保持されている。微小要素の間隙は間隙径であらわす。すでにここまで考えをまとめてきた。つぎにやることは，毛管力と間隙をうめている水との関係をつけることである。まず，毛管力と水―空気界面を張るところの間隙径との関係を，ラプラスの式にもとづいて次のように書く。

$$\frac{h_o}{h} = C \cdot \frac{r_k}{d} \tag{5}$$

ここで，h: サクション，h_o: サクションの最小値，r_k: 水―空気界面がある間隙半径，C: 間隙への水の出入りの際の接触角の差異を補正する係数。

水―空気界面が r_k という間隙径のところに形成されたときの単位の土――すなわち，N個の微小要素が集まったもの――に含まれる水の量が r_k/d の関数で書ければ，r_k/d がなかだちして，毛管力と水量との関係が知れる。この水量の算出は，水にたいする間隙の状態をすべての間隙について１つ１つきめてやった上で，水をもつ間隙についてその水について加算しさえすればよい。

保水に関する間隙の状態は，すでに３つないし２つを指定した。実は，それは可能性として指定していたにすぎない。実際に水の減少ないし増加にともなって間隙がそのような保水の状態をどのように移り転じて経験するかは，個々の間隙における最大と最小の径を関係づける一次式の勾配の大きさがきめる。Fig. 1, 2 に図示されている α がきめるのである。脱水過程でみてみよう。α が大きい $(\alpha \approx 1)$ と，X 型の大部分の間隙はほとんどいつも部分的に水をうめ，O 型のほとんどの間隙はほとんどいつも水で満杯の状態になる。すなわち，このとき空（から）の間隙はさがしにくい。α が極度に小さい $(\alpha \approx 0)$ と，X 型の間隙が部分的に水をもつことは瞬時的になる。すなわち，すべての間隙は水で満杯か空（から）かどちらかをとることになる。間隙を X 型，O 型に区別することの必要性が失われる。吸水過程の場合には，$\alpha \approx 1$ のとき O 型の間隙の部分的保水が恒常的，X 型の間隙の空（から）状態が恒常的というように変わる。すなわち，満杯の間隙はみつけにくい。$\alpha \approx 0$ のとき，O 型の間隙の部分的保水が瞬時的となる。

筆者はここでまったくの仮想をした。粘土，泥炭等特殊な土でなく普通の砂質の土をまず対象としてみよう。こうした土では，いま述べたような“ほとんどいつも”とか“これかあれか”という極端さを意味する形容詞を

必要とするような状態変遷はとらないであろう。同程度の重みをもってとりうる状態を経験するにちがいない。どの状態の発現も等確率であることが砂質の土で支配的ではあるまいか。発現確率がかたよることは特殊な土で支配的なのではないかと考えてみる。この考えのもとでは，α に $0<\alpha<1/2$ の制限をつければよい。このとき，間隙の水にたいする状態はどうなるか。

脱水過程では，X 型の間隙の場合，$1-\alpha<r_k/d\leqq 1$ のとき最大間隙半径$<r_k$ の間隙は水を満杯，その他の間隙は部分的保水である。$\nu+\alpha<r_k/d\leqq 1-\alpha$ のとき最大間隙半径$<r_k$ の間隙は満杯，$r_k<$最大間隙半径$<r_k/d+\alpha$ の間隙は部分的保水，その他の間隙は空（から）である。$\nu<r_k/d\leqq\nu+\alpha$ のとき最大間隙半径$<r_k/d+\alpha$ の間隙が部分的保水，その他の間隙は空（から）である。O 型の間隙の場合，$\nu<r_k/d\leqq 1-\alpha$ のとき最小間隙半径$<r_k$ の間隙は水を満杯，その他の間隙は空（から）である。吸水過程では，X 型の間隙の場合，$\nu<r_k/d\leqq 1$ のとき最大間隙半径$<r_k/d$ の間隙は水で満杯，その他の間隙は空（から）である。O 型の間隙の場合，$1-\alpha<r_k/d\leqq 1$ のとき最小間隙半径$<r_k/d-\alpha$ の間隙は水で満杯，その他の間隙は部分的保水である。$\nu+\alpha<r_k/d\leqq 1-\alpha$ のとき最小間隙半径$<r_k/d-\alpha$ の間隙は水で満杯，$r_k/d-\alpha<$最小間隙半径$<r_k/d$ の間隙は部分的保水，その他の間隙は空（から）である。$\nu<r_k/d\leqq\nu+\alpha$ のとき，最小間隙半径$<r_k/d$ の間隙は部分的保水，その他の間隙は空（から）である。

間隙中の水量 w は，満杯の場合，

$$w=2\pi d^3\left(\frac{r_o}{d}+\frac{\alpha}{2}\right)^2+\frac{\pi}{6\alpha}(\alpha d)^3$$

または

$$=2\pi d^3\left(\frac{r_d}{d}-\frac{\alpha}{2}\right)^2+\frac{\pi}{6\alpha}(\alpha d)^3 \qquad (6)$$

部分的保水の場合，

$$w=\frac{2\pi d^3}{3\alpha}\left\{\left(\frac{r_k}{d}\right)^3-\left(\frac{r_o}{d}\right)^3\right\}$$

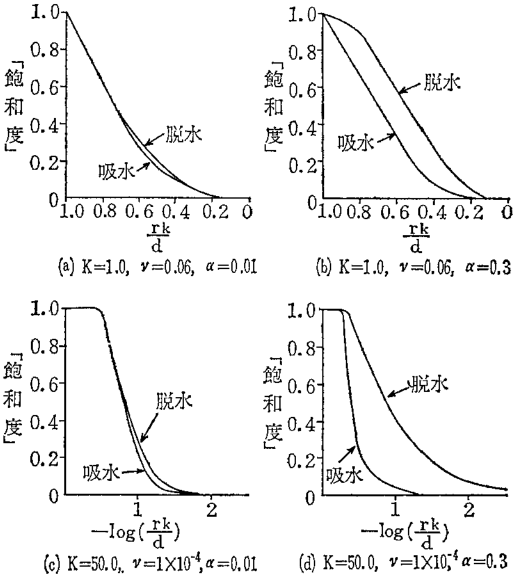
または

$$=\frac{2\pi d^3}{3\alpha}\left\{\left(\frac{r_k}{d}\right)^3-\left(\frac{r_d}{d}-\alpha\right)^3\right\} \qquad (7)$$

さて，単位の土――微小要素の N 個の集まり――の間隙中の水量は，r_k/d の区分帯毎にこの水量と間隙の確率密度関数とを用いてそこでの総水量を算出し，r_k/d の大きさに従ってそれを順次加算してゆけば求められる。この結果は r_k/d の関数となる。K，ν，α をパラメータとする。r_k/d に区分帯があるために，それは 3 つに区分されて求められる。$\nu\leqq r_k/d<\nu+\alpha$，$\nu+\alpha\leqq r_k/d\leqq 1-\alpha$，$1-\alpha\leqq r_k/d<1$ の区分である。この区分は脱水過程，吸水過程の区別は問わず，共通なものになる。

最終的には，この結末は水分量が飽和度様式であらわされて終る。いうまでもなく，間隙中の水のあり方の違いによって，脱水過程の「飽和度」と r_k/d の関数関係と吸水過程のそれとは違ったものとなる。

r_k/d の関数としての間隙充填水の「飽和度」をあらわす式は，大変長大になる。式の記載はここでは省略し，**Fig. 4** にそれを図示して式の記載に替えたい。



(a) K=1.0, ν=0.06, α=0.01　(b) K=1.0, ν=0.06, α=0.3

(c) K=50.0, $\nu=1\times10^{-4}$, α=0.01　(d) K=50.0, $\nu=1\times10^{-4}$, α=0.3

Fig. 4「飽和度」曲線の例

ここで飽和度に「　」印をつけたのは，普通に飽和度というときのものとは違い，それは間隙をうめる全水量にたいする水量の比をさすものであるからである。

5　間隙の形による水分ヒステリシス[4)]

これまで，脱水過程と吸水過程とを対比して水分量の計算の仕方を考えてきた。特にヒステリシスという問題の立て方では話題をすすめてはきていない。実は，これまでの話の中には間隙の形による水分ヒステリシスが，その一面ではあるが，巧妙に考慮されていたのである。

間隙の形による水分ヒステリシスは，1つには，間隙の拡大縮小のため脱水過程では水の貯留場所となっていた間隙の一部が吸水過程では同じ大きさの毛管力のもとではもはやそうはならない，より小さい毛管力のもとで水の貯留場所となるために生ずる。2つには，“脱水過程”では水の貯留場所であった間隙の一部が吸水過程では絶対的にそうはならないために生ずる，と考えられている。前に述べた脱水過程と吸水過程とにおける間隙の水に関してとりうる状態の差異は，この第一の事項を

とり込んでいるのである。例えば次のように前述の一部を言い換えればそれでこのことが理解されよう。X型の間隙の場合，脱水過程では水が在る間隙は最大間隙半径が r_k より小さいものと r_k より大きくても最小間隙半径が r_k より小さいものであるのに，吸水過程ではそれは最大間隙半径が r_k より小さいものだけになる。O型の間隙では，脱水過程ではそれは最小間隙半径が r_k より小さいもので満杯だったのに，吸水過程ではその間隙の一部すなわち最大間隙半径が r_k より大きいものが満杯でなく部分的保水に変る。すなわち，X型の間隙，O型の間隙双方共に，吸水過程では脱水過程に比してその保水量がすくなくなるように考えていたのである。

第2の事項は，区分帯毎の総水量を計算する際に，その区分帯に属する間隙の数の配慮にあたって使われたものである。いま，いろいろの大きさの間隙が集ってN個ある。吸水過程の場合どの大きさの間隙がそれぞれどの位の数で水の貯留場所に使われなくなるのだろうか。次のような研究が最上によって報告されている。V_1 という大きさの粒が N_1 個，V_2 という大きさのが N_2 個，以下同順に V_n という大きさのが N_n 個からなるN個の粒の集りからM個をとり出すとき，M個の内訳が，V_1 という大きさの粒が $C \cdot N_1$ 個，V_2 という大きさの粒が $C \cdot N_2$ 個，以下同順に V_n という大きさの粒が $C \cdot N_n$ 個となるのが確率的に最も起こりやすい。ここで，$C=M/N$ である[5]。

これにならえば，吸水過程で水の貯留場所に使われなくなる間隙の内訳はどの大きさの間隙でも一定の比率で生じているとして差支えなかろう。こう考えると，確率密度関数は“脱水過程”と吸水過程とでは共通のものとなる。結局，水の貯留場所に使われる間隙の総数がNからMに減ることだけが，第2の事項による“脱水過程”と吸水過程とでの差異としてみられることになる。しかし，保水量を求めたとき，保水量を絶対量ではなく飽和度様式であらわしてしまうと，このNとMという個数の因子はここでは消えてなくなり，この差異はなんの役割も果さない。

ところで，いままでずっと脱水過程という4文字は黙ってそのままで使用してきた。ところがここで“　”印を附した“脱水過程”を突如使用した。脱水過程には，まったく脱気して水で飽和された状態から脱水される過程，1度間隙をうめる水がまったく脱水されてその後の吸水操作によってつくられた気相を若干含む疑似飽和の状態から脱水される過程，更に吸水操作がその途中で打切られてその水分状態から脱水される無数の過程等種々のものがある。この研究ははじめの2つをその対象としている。いままで無印で脱水過程と称したときにはこの2つのもので共通した事項について述べていたときだったのである。ところが，NとMの問題に関してはこの2つの脱水の過程では事情がちがっている。すなわち，まったくの飽和のとき，間隙の総数と水をもつ間隙の総数とは等しい。それで，まったくの飽和からの脱水の場合はNが採用される。疑似飽和のとき，吸水の前歴のため水をもつ間隙の総数はMとなる“　”印つき“脱水過程”は前者の脱水の過程を指していたのである。以後，この2つを分ける必要がある場合，前者を脱水過程 (I)，後者を脱水過程 (II) ということにしよう。念のためつけ加えるなら，脱水過程 (I) と脱水過程 (II) とでは，確率密度関数は共通のものでよい。NとMの因子は飽和度様式であらわした保水量の式では消えてしまうので，両過程の保水量の式は同等のものとなる。くどいようだが，確率密度関数の対象となった間隙について念のためまとめをしておこう。

はじめに，間隙の確率密度関数を求めた。そのときの間隙は容易に土の外に排出しうる水がうめうる間隙のすべてのものを考えていた。脱水過程 (I) ではこの間隙の確率密度関数をそのまま用いた。脱水過程 (II) および吸水過程では，この間隙のうちの疑似飽和に貢献する間隙を考えて，その間隙の確率密度関数を導いた。導びいた結果は，はじめに求めたものと式の上でたまたま同等であったにすぎない。

6 毛管力による水分ヒステリシス

水分ヒステリシス発生の第3の原因は，水の固相に対する接触角に求められている。接触角の変化を配慮することから言えば，ひとつには水分変化の過程を同じくする場合の水分量の違いによる接触角の違いを配慮すべきであろうし，ふたつには水分変化の過程を異にする場合のそれぞれの過程のあいだでの接触角の違いを配慮すべきである。主に，水分ヒステリシスに関係するものは後者に関するものである。しかしながら，話は前者に関するものから始めよう。それは，前者に関するものもこの報告の中では考慮のうちにあるからである。蒸発による水分減少，降雨による水分増加等を頭に浮べてみると，この場合水分の増減に伴う溶質の濃度変化が考えられてそれぞれの過程の経過の中で接触角の違いを配慮する必要が生じよう。土柱法，吸引板法，遠心法のように溶質も水と共に排出されてしまうような水分減少過程を念頭に置けば，この配慮は不要であろう。吸引板法による水分増加を念頭に置くときはどうだろうか。供給水に溶質を含む水を使わず蒸留水を使ったとすれば，これは配慮せざるをえまい。筆者は，とりあえず，吸引板法，土柱

法，遠心法による水分減少過程を，そして蒸留水を供給水に用いる吸引板法による水分増加過程を念頭においてみた。それで，この報告では，脱水過程の場合は接触角の変化は無視することにし，吸水過程の場合にはそれを尊重することにしてみた。

ところで，後者のような脱水過程と吸水過程とでは接触角に違いがあろうことは従来からも明らかに称されてきたことである。ここでも，これは素直に認めるものである。水分変化の過程を異にする場合の接触角とヒステリシス発生機構とのつながりをいままでの話の中で理解するには，脱水過程で r_k の間隙半径のところに水—空

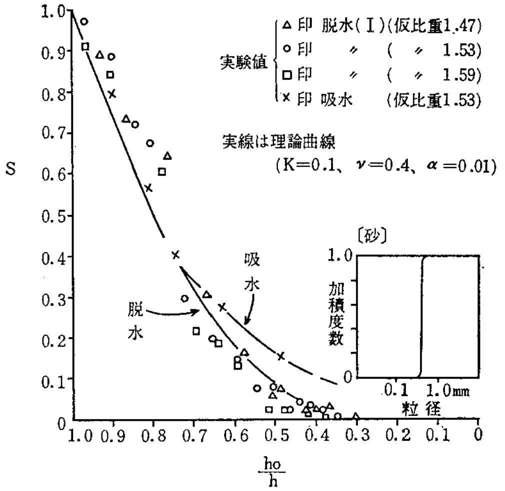


Fig. 5　S—$\frac{h_o}{h}$曲線（その 1）

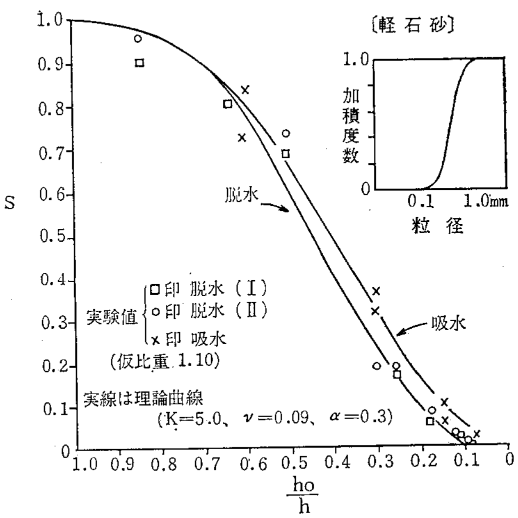


Fig. 6　S－$\frac{h_o}{h}$曲線（その 2）

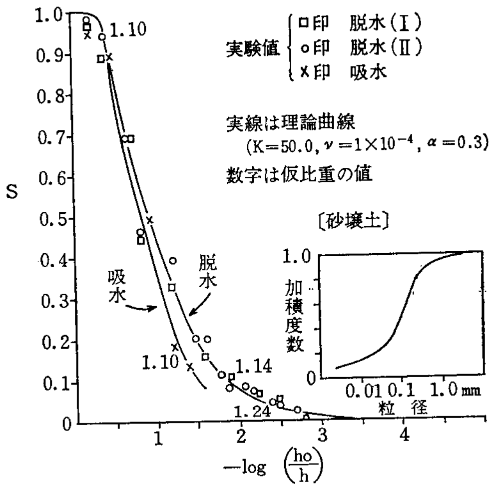


Fig. 7　S～$\frac{h_o}{h}$曲線（その 3）

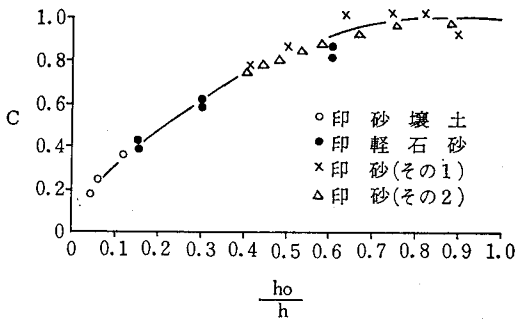


Fig. 8　C－$\frac{h_o}{h}$曲線

気界面が張られている場合と吸水過程で同じく r_k の間隙半径のところに水—空気界面がはられている場合とをくらべてみればよい。両過程で接触角が違うとすると，両過程の毛管力の大きさは違うことになる。それで，水分ヒステリシスが発生すると理解することが出来る。

いままで述べてきたことは，(5)式中のCでとらえられる。脱水過程では C=1，吸水過程では C=C (h_o/h) と考えてやればよい。すなわち，C=C_o/C，ここで C_o は h=h_o のときの C，C は1過程中の接触角の違いを補正する係数で C=C (h)，と考えることにしたからにほかならない。

毛管力によるヒステリシスに関しては，実は，もう1つ考えてやらねばならないことがある。それは，水の表面張力の大きさの溶質を含むことによる補正である。ここでは，吸水の場合の水分増加の際に，接触角の違いを考察したときの理由とまったく同じ理由で，これを考慮する必要がありそうである。しかしながら，それは，溶

質による水の表面張力の大きさの変化が普通の土壌溶液中の溶質でみる限り無視しても差支えないぐらい小さいということで，ここでは無視することにしておこう。

毛管力〜水分量曲線の理論値と実験値との対置を Fig. 5, 6, 7 に示す。実験的に求めた C〜h_o/h 曲線を Fig. 8 に示す。

7 体積変化による水分ヒステリシス

更に，脱水過程での土の体積減少が吸水過程で元に復さないための水分ヒステリシスがあろう。

脱水，吸水それぞれに独自の過程をたどる間で，収縮膨張による土の体積変化が生じ，水分量と毛管力がそれがない場合にくらべて異なるであろう数値を示すことがある。ここでのヒステリシスは，この事実の内容を極めて知ることで理解することが出来る。脱水過程で体積収縮が生じた場合を考えてみよう。体積収縮によって，微小要素の大きさがすべてについて均一に小さくなったと考えてみよう。単位の土を構成する微小要素の数はNからLに増えたことになる。どの大きさの間隙をもつ微小要素がいくつ増えているのだろうか。前に述べた最上の理論にもとづいて，やはり同じ比率ですべてのものが増加していると考えるのがもっともらしい。さて間隙の図形的表現では収縮前後に相似の変化を考えてみる。相似比を ξ であらわす。そうすると，間隙量は収縮後はもとの ξ^3 倍となる。r_o/d, r_a/d, r_k/d 等は，それを構成する r_o, r_d, r_k, d 等はもとの ξ 倍であるが，これは変らない。β は，ここでは説明を省略したところでそう結論づけられるのだが，間隙量との関連でもとの $1/\xi^3$ 倍である。K は，β との関連でもとの値と変らない。α や ν は，それぞれ次元のない数であるためにもとの値と変わらない。1個の間隙中にある水の量はもとの ξ^3 倍となる。こういうことがわかってみると，収縮後の間隙の確率密度関数は収縮前のそれと同等になる。r_k/d の関数としての飽和度様式であらわした保水量の式は，NとLとの違いが前に述べたとまったく同じ事由で消えてしまい，収縮前のそれと同等な式であらわせることになる。このことは Fig. 5 で実験的にもうなずけるものである。これから類推して，吸水過程の膨張の過程でも，膨張後にあっても，水をうめる間隙の確率密度関数は膨張前のそれと同等な式となろうし，r_k/d の関数としての飽和度表示の保水量の式は膨張前のそれと同等な式となろうことが考えられよう。

さて，話を元に戻して，過程を異にする際のヒステリシスを綜合的に明らかにしよう。脱水過程での体積減少が吸水過程で完全には元に復さないということの実験事実にもとづく精確な理解は，脱水過程で毛管力が大きくなるにしたがって体積減少が少しずつ発生し最終的にそれが積み重なってみられる。吸水過程に転じて膨張の体積増加が少しずつ発生し最終的にそれが積み重なってみられる。同じ毛管力の値のところで乾燥密度が異なる。もちろん脱水過程のそれが吸水過程のそれより小さい。こういうものである。

r_k/d の関数としての保水量はそれぞれの過程で体積変化によって左右されない，それはそれぞれの過程に1つしかないことがいまわかった。

ところで，飽和度表示の保水量と称してきたものは，

$$S=\frac{\theta-\theta_o}{\theta_s-\theta_o} \tag{8}$$

であらわされるものである。いままでの話から，θ は任意の水分状態のときの体積含水率，θ_o は間隙充塡水を除いてしまったときの体積含水率である。θ_s には，脱水過程 (I) ではまったく空気のないときの飽和体積含水率をあてればよく，脱水過程 (II) と吸水過程では疑似飽和体積含水率をあてればよい。

体積変化が生じたとき，θ_s の値はその前後で異なるだろう。水分—毛管力曲線上で，θ_s の値をとることをやめる脱水過程の毛管力 h_o，はじめて θ_s の値をとる吸水過程の毛管力 h_o の値等もその前後で変るだろう。θ_s は述べてきたところからいえば間隙の大きさと数できまる。同じく h_o は間隙の最大のものできまる。かくして，このヒステリシスは，間隙の形，確率密度関数や保水の形態等の変化によりみられるのではなく，間隙の大きさと数の変化によりみられるものと考えてよいのである。

ふり返って，脱水過程 (I) と脱水過程 (II) との間にみられるヒステリシスを思い直してみよう。脱水過程 (I) と脱水過程 (II) との間のヒステリシスの発生事由が，丁度この体積変化による発生事由と似たものであることに思い当たる。違うところは当然ある。それは間隙の大きさに関しての理解である。体積変化によるものの場合は間隙の大きさの変化がその事由の一つになっているのに脱水の過程の違いの場合のヒステリシスではそれは発生の事由にはしない。それは，脱水過程 (I) と脱水過程(II) とでは水分—毛管力曲線上にみられる h_o の値が違いはないということがその際の背景に考えられているからである。

水分—毛管力曲線に直接かかわる話はこれで止める。それにあたって一言つけ加えるなら，S-r_k/d 曲線を通常の水分—毛管力曲線に移すには S を(8)式にもとづき，h は(5)式にもとづいてそれぞれ体積含水率，サクションに移してやればよいのである。

8　土を特徴づける因子

土を特徴づける因子として従来いわれていたものはもちろんここで使用している。それは，ほとんど空気を含まないような飽和のときの体積含水率，吸水過程にみられる疑似飽和のときの体積含水率，間隙充塡水を除いてしまったときの体積含水率，脱水のときにみられる急激に排水が始まるときの毛管力，吸水過程で疑似飽和に達したときの毛管力，間隙充塡水を失ったときの毛管力等である。

ここで新しく使用を試みた因子は，土を構成する微小要素の大きさ d，単位の土を構成する微小要素の数N，間隙径のうち最も小さいものをあらわす数 ν，間隙形の複雑さの程度を示す数 α，間隙分布を特徴づける数 K 等である。新しくといっても，d は間隙の最大径に等しいと考えているためそれは上に述べた毛管力のうちのはじめの2者の代名詞である。ν はその3番目のものの代名詞である。体積含水率のうちはじめの2者は，間隙の大きさ，数，確率密度関数等が一緒になってきまるものであって，従ってそれはここでは d から K までそれぞれであらわしているものと考えて差支えない。3番目のものは，この話しの相手とするものではないために，それをあらわす因子はここにはない。結局，間隙をうめる水を相手にして，d から K まで5個の因子を使用している。これら因子を単なるパラメータと単純に理解すると，パラメータ数が多すぎる，5個もパラメータを使えば実験値をよくあらわす式が出来るのは当り前である等の言葉が聞かれよう。しばし考えてみるべきである。土は，表現するにはあまりにも複雑なものである。このことだけからも土の表現は，ある程度の数の因子の集団をもたなければ出来にくいと知るべきである。そして，土の表現にも，物の大きさや個数，それらの混じり方を示す数値など通常の物の表現に欠くことの出来ない因子はやはり必要である。d，ν，N，K 等はこの類の因子である。α にだけパラメータの匂いがしないでもない。しかし，それも物理的意味がきちんとつけられていることでそれはかなり割引きされると考えたい。

諸因子の数値のだいたいのメドを次につけておこう。砂も含めて砂質の土ということで，d は 0.1 mm 前後である。N は，100 cm^3 の土を考えるとき，10^8 個前後の程度である。ν は，砂で 0.01〜0.3，土となると 10^{-4} 程度をとる。α は，粒径の比較的大きい砂で 0.01 に近く，粒径の小さい砂とか粒径分布の幅が広い土となると 0.1〜0.3 になる。K は，α でみた区分けでいって，前者のもので 0.1 に近く，後者のもので 5〜50 になる。

おわりに

従来，pore size distribution なるものがあった。これをいままでの言葉で書けば，

$$\text{pore size distribution} = \frac{1}{d} \cdot \frac{dS}{d\left(\frac{r_k}{d}\right)} \tag{9}$$

となろう。従来，S の内容は理解に苦しむところが多かった。いままでの話はこの S の内容をそれなりの立場と仕方で明確にしてきたものであると考えてもよい。

ところで，数学的な厳密さをいうと，それに欠けるところがないこともない。間隙の扱いがはじめ離散的であった。保水量をあらわす式は連続変化をするように考えられている。離散的な把えの連続的表現への移行のところに，すなわちそれがある。これは ν に影響を与えている。ν が大きいと数学的厳密さが保てなくなる。この意味でいえば，この話しは，粒径の大きい，そろった粒の集まりといえるような砂にはあまり適用すべきではないのだろう。

物理的にも厳密さを欠くところがなくもない。N の数の小ささによって来るものである。確率的考察がこの程度の N の数の大きさのところで許されるものだろうか。確からしさが若干そこなわれているのではないかと考えられる。

さて，将来にいままで述べてきた話が根本的に破綻をきたすとすれば，それは間隙の確率密度関数がここで述べたものでは不適であるとされるときであろう。例えば，100 cm^3 の土を 10^8 個とまでいわないまでもかなり多数に切り分けて，その1つ1つについて顕微鏡的に間隙量をはかり，間隙量の分布を実験的に求めてみる。この結果が出たときがそのときであろう。

とまれ，以上をもって，土特に砂質の土の保水の構造は一通り理解することが出来よう。そして，例えば粘質の土への発展，透水との関連の追求などやってみる必要はありそうな気がする。

紙数の関係で，説明，式の記載のかなりの部分，用いた実験法，実験値等の記述を省略し，概念的なところの説明に終始した。省略した部分については文献3，4，にゆだねたい。

引用文献

1)　妹尾　学：農土論集，**14**，(1965)
2)　岩田進午：土壌肥料の研究（第2集），養賢堂(1971)
3)　中野政詩：農土論集，**35**，(1971)
4)　中野政詩：昭和47年度農土学会大会講演要旨集 (1972)
5)　最上武雄：土木学会誌，**28**，(1943)