

鉛直カラムによる毛管水帯の挙動に関する実験

A Laboratory Experiment on the Behavior of Capillary Zone using Vertical Columns

A. K. アリム*・梶根 勇**

Abdul Khabir ALIM and Isamu KAYANE

はじめに

最近、地下水の涵養や流出に果たす地下水面直上部の水の役割の重要性を指摘した実験的研究が幾つか発表された(佐倉・谷口, 1983a; 1983b)。これらの研究は、今後、自然界における地中水の挙動の解明へ発展するものと期待される。一方、毛管水帯または毛管水縁に関しては、次節で述べるようにその定義も人によって区々であり、その挙動について実験的に解明すべき点も多く残されている。本研究の目的は、鉛直カラムを用いて、地下水面の変動に伴う地下水面付近の含水量およびポテンシャルの変化を明らかにし、毛管水帯の実態を明確にすることにある。

I 毛管水帯または毛管水縁に関するこれまでの定義

Meinzer (1923, p. 26) は capillary fringe を“飽和帯の上にあり、飽和帯の水と連続しているが重力に抗して働く毛管力によってそれよりも上に保持されている水によって、一部または全部の毛管間隙が満たされている部位”と定義し、その中の水を fringe water と名づけた。fringe water という用語はその後の文献にほとんど見られないが、capillary fringe に関する Meinzer の定義は地下水学の教科書に広く引用された。しかしこの定義では fringe の上限が明示されていないため、

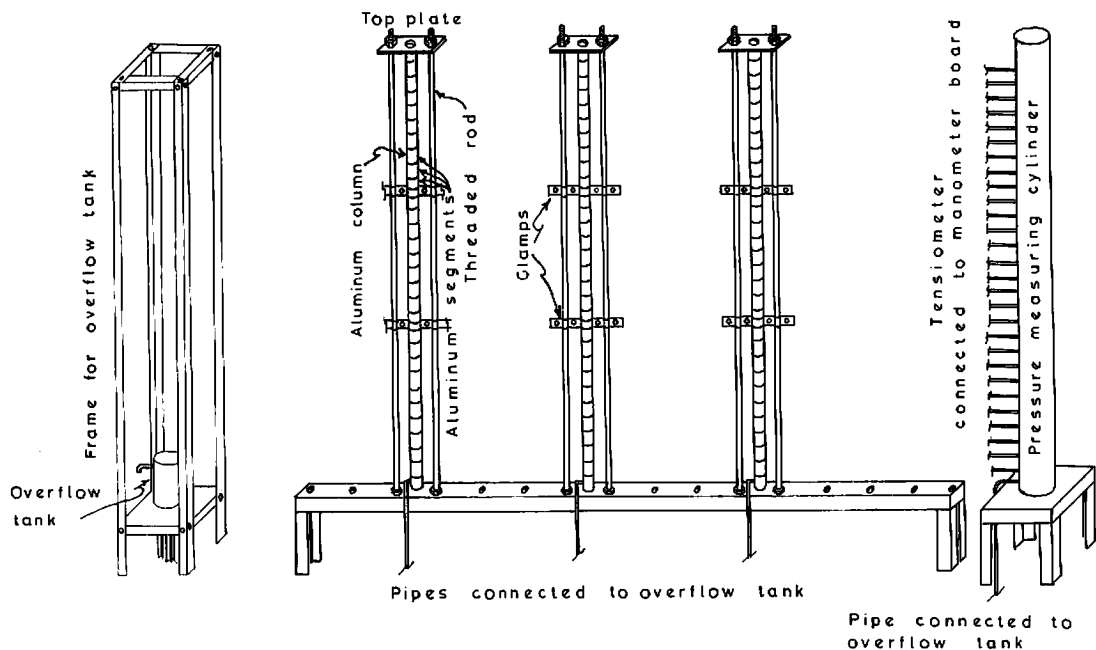
何らかの方法で定量的に表示する必要が生じた。

アメリカ合衆国地質調査所の ad hoc Committee on Redefinition of Ground-Water Terms は Meinzer の定義を補足して、“若干の定量的研究では、間隙空間の50%が水で満たされたレベルを上限と定義すると便利である”と述べている。(Lohman *et al.*, 1972, p. 3)。また Bear (1979, p. 23) は“実用目的には、それ以下の土壌は実質的に飽和(例えば75%)しているとみなしうのような、ある平均的な滑らかな面を capillary fringe の上限とする”と述べている。しかし飽和度50%と75%のいずれをその上限とするかは、まったく便宜的な問題である。

このようなあいまいさは、地下水面からの高さが増すにつれて、より小さな間隙しか水で満たされなくなり、平衡水分プロファイルの飽和度が漸減することに由来する。Childs (1969, p. 333) や Hillel (1971, p. 169) は土壌水の吸引力が土壌の空気侵入値と等しくなるレベルを capillary fringe の上限としている。Bouwer (1978, p. 28) も同様に、排水過程では空気侵入値、吸水過程では水侵入値に相当する高さを capillary fringe の上限と定義している。これらの定義では、“実質的に飽和している部分”の上限が空気侵入値または水侵入値で示してあるので、それらの値の決定法については問題は残るが、便宜的であるという非難はまぬがれることが出来る。しかしこの定義

* 筑波大学・院・地球科学 **筑波大学地球科学系

(1983年4月22日受理)



第1図 カラム実験装置

では Meinzer の述べた “一部の毛管間隙が水で満たされている部位” は capillary fringe には含まれないことになる。

佐倉・谷口 (1982a) は土壌水の移動機構に関するカラム実験の結果から、カラム内の土壌は平衡水分分布によって、下方から、“地下水面上の土粒子間隙が水で完全に満たされた飽和毛管水帯、その水が上へゆくに從って減少する不飽和毛管水帯、そして土粒子間の接合部に水がリング状に付着する懸垂水帯”の三つに区分されるとした。そして“ぬれ前線が懸垂水帯を降下して、不飽和毛管水帯の上端に到達すると、毛管水帯ではすべての場所で一斉的な土壌水の移動が始まる”という重要な指摘を行っている。

ロージェ (1963, p. 22) は“毛管水帯の厚さは水の毛管上昇の限界高さに相当する”と定義している。また細山田 (1966) はそれをさらに飽和毛管帯と不飽和毛管帯に分け、それぞれの毛管高についてのそれまでの研究のレビューを行っている。佐倉・谷口もこれらの定義に従っているが、

彼らはさらに毛管水帯を飽和毛管水帯 (saturated capillary water zone) と不飽和毛管水帯 (unsaturated capillary water zone) に分け、両者で水の保持形態・運動形態が異なることを指摘している。なおロージェの毛管水帯の原語は капиллярная кайма で英語に訳せば capillary fringe である。

ところで capillary zone という用語は、邦訳では毛管水帯 (水収支研究グループ, 1973, p. 95) であるが、Todd (1980, p. 33) は capillary zone と capillary fringe をまったく同義に用いている。また Freeze は capillary fringe の定義のあいまいさを指摘し (Freeze and Cherry, 1979, p. 44)、空気侵入値以下の部位には tension-saturated zone という新語を提案している。しかしいまのところ英語文献では capillary fringe の使用が圧倒的であるようにみられる。また我が国でも capillary fringe の邦訳に毛管水帯と毛管水縁を同義として当てているが (科学技術庁資源調査所, 1975, p. 15)、酒井 (1965, p. 21) は毛管水縁層を、また樺根 (1980, p. 147) は空気侵入値以下の

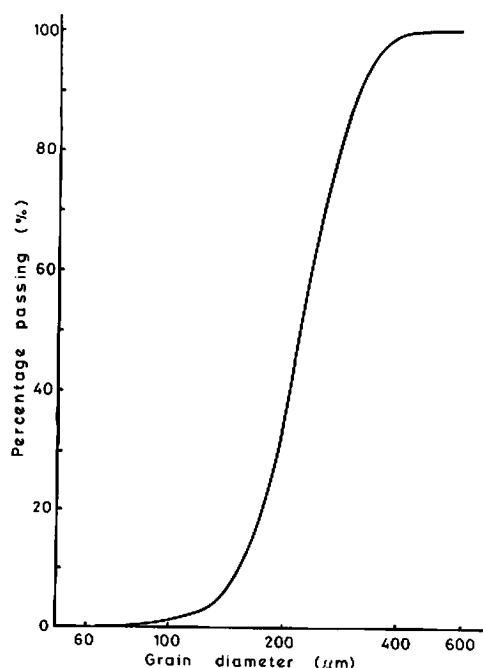
層に限定して毛管水縁を用いている。

このような用語の混乱は、発展しつつある研究分野では間問みられることである。この機会に、capillary fringe または capillary zone の定義を再吟味してみることも、無意味ではないと思われる。

II 実験装置

実験装置は第1図のように、全水頭測定用の1本の大カラムと、含水量測定用の複数の小カラムから成る。大カラムは内径20cm、高さ150cmの透明塩化ビニール管製で、底から2.5cmの高さを最下部として、そこから上へ5cm間隔に28本のテンシオメータがカラム内に挿入してあり、各テンシオメータは水マノメータに接続されており、全水頭を直接読取ることが出来る。

小カラムは内径4.4cmのアルミニウム管を高さ5cmの断片に切断し、30本の断片を第1図のように、長い鋼鉄製の2本の棒で締め付けて1本のカラムにしたもので、鉄製の架台上に必要な本数だけ



第2図 標準砂の粒径分布曲線

セットできる。本実験では3本のカラムをセットしたが、1本は含水量測定に失敗したので、実際に使用したのは2本だけであった。大・小のカラムの下部にはガラスウールを詰め、すべてのカラムは排水兼給水パイプで同一のオーバーフロータンクと連結してある。このオーバーフロータンクは内径12.5cm、高さ20cmの塩化ビニール管製で、タンクの位置を上下に調節することにより、各カラム内の地下水面の高さを同時に変化させることが出来る。

実験には標準砂を用いた。この砂の粒径分布は第2図のようで、粒径積算分布曲線の10%、20%、50%、60%に相当する粒径(D)は、 D_{10} 0.16mm、 D_{20} 0.200mm、 D_{50} 0.228mm、 D_{60} 0.24mmである。したがって uniformity coefficient (D_{60}/D_{10}) は1.5、concavity coefficient ($(D_{50}^2/D_{10} \cdot D_{60})$) は1.04である。また砂の真比重は2.66、間隙率は平均44.1%、最大45.8%である。

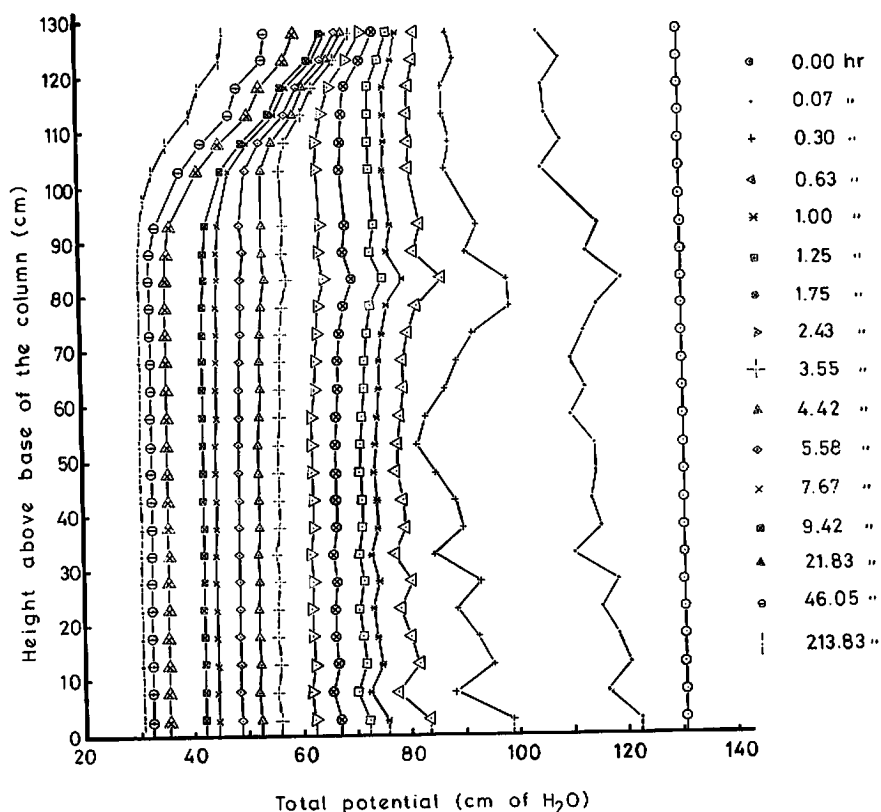
砂の充填は“水じめ”法で行った。すなわちカラムに脱気水を10~15cmの深さまで入れ、カラム上部から乾燥砂を3~5cmの厚さになるまで投入し、棒で水中の砂を突き固めながら、カラムの最上端に砂が達するまで充填をつづけた。

III 実験結果

(I) 排水実験 I

砂の充填終了後、カラムの底から130cmの高さにセットしておいたオーバーフロータンクの水位を、瞬間的に30.4cmの高さまで約100cm低下させ、その状態で9日間排水をつづけた。この間の全水頭の変化を大カラムのテンシオメータで測定した。9日後に大カラムの地下水面は30.7cmまで低下したが、30.4cmには達せず、この段階でも排水はまだ完全には終了していないことがわかる。

全水頭の時間変化を第3図に示した。排水開始時には、カラムの内部は静水圧分布を示しており全水頭勾配は全層にわたって0であった。排水開始後38分までの全水頭は、高さに関係なく不規則な変化を示しているが、これはテンシオメータの応答時間の器差によるものと考えられる。その後



第3図 排水実験Ⅰの全水頭分布の時間変化

排水開始後1～2時間で全水頭勾配は地下水面上30～35cmの高さ（カラム底から60～65cmの高さ）まで、また1～2日後には地下水面上55～60cmまで、それぞれほぼ0に近くなった。

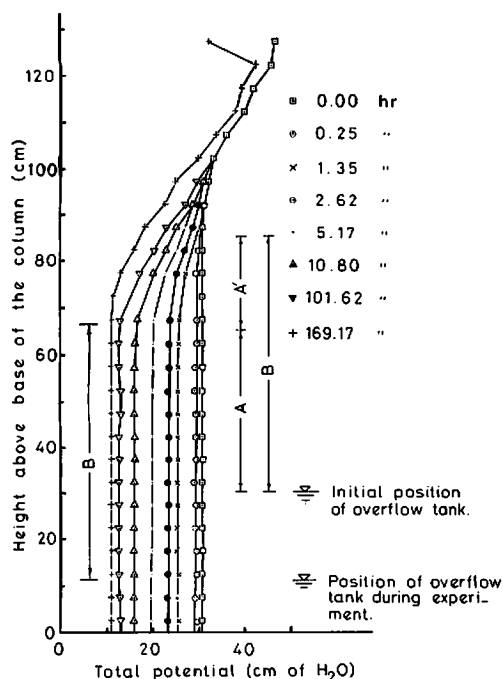
地下水面の低下に対する全水頭の応答特性がそれぞれほぼ等しいこれら二つの部位の上限を厳密に示すことは困難であるが、今後の議論を容易にするため、一応の日安として35cmと55cmをそれぞれの上限と定め、以後、地下水面上0～35cmの部位をA帯、35～55cmをA'帯、0～55cmをB帯と呼ぶことにする。

(2) 排水実験Ⅱ

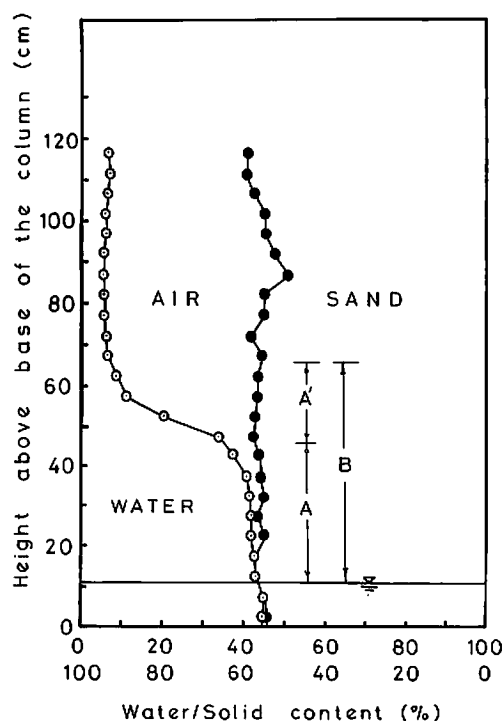
排水実験Ⅰの最終状態を初期条件として、オーバーフロータンクの水位を30.4cmから11.4cmまで低下させ、この状態で約7日間排水をつづけた。実験Ⅰと異なり、排水時間は短かったが、約7

日後に大カラム内の地下水面はオーバーフロータンクの水位まで低下した。これは実験Ⅰに比して水位低下量が小さかったためと考えられる。

排水期間中の全水頭の時間変化を第4図に示した。図には実験Ⅰで明らかになったA帯とB帯の範囲が記入してある。この図から、水位低下後のB帯の全水頭勾配は常にほぼ0、全水頭の時間変化量もB帯内では等しいことがわかる。この場合、水位低下前のA帯の上限の位置と、水位低下後のB帯の上限とがほぼ一致しているのは、A帯の高さが35cm、B帯のそれが55cmであるのに対して、水位低下量が19cmであったという偶然の結果と考えられる。またA帯とA'帯の反応に差が認められなかったのは、実験Ⅰに比べて水位低下量が小さかったためと考えられる。事実、実験Ⅰにおいても、A帯とA'帯の反応の差はそれほど顕



第4図 排水実験IIの全水頭分布の時間変化

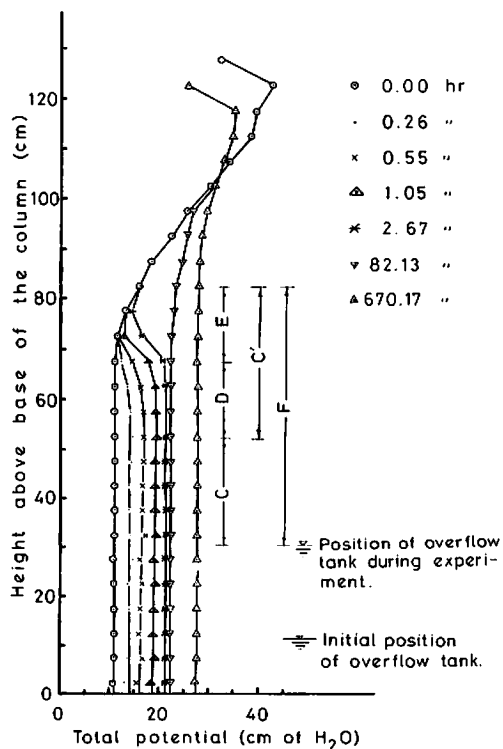


第5図 排水実験後のカラムの3相分布

著ではなかった。

排水がほぼ終了した約4日後に、1本の小カラムを分解して各断片の含水量を重量法で測定し、第5図を得た。Corey (1977, p. 37) は排水過程の毛管圧(p_c)—飽和度(S)曲線において、displacement pressure と air entry pressure を区別し後者を p_c — S 曲線上で dS/dp_c がほぼ一定になり始める p_c と定義している。Corey の方法に従うと第5図で空気侵入値は 36cm H₂O となり、A帯の高さにほぼ等しい。従って実験Iで明らかになったA帯は、地下水面上にあって飽和帯と連続している水によって“実質的に飽和している”とみなすことのできる部位と定義することが出来る。

第5図においてA'帯の上限は、含水量が比残留率(この場合は6%)に等しくなる位置と定義することが出来る。A'帯内では含水量は高さとともに大きく変化するが、第4図のように、排水時の全水頭の時間変化率はほぼ等しい。



第6図 吸水実験の全水頭分布の時間変化

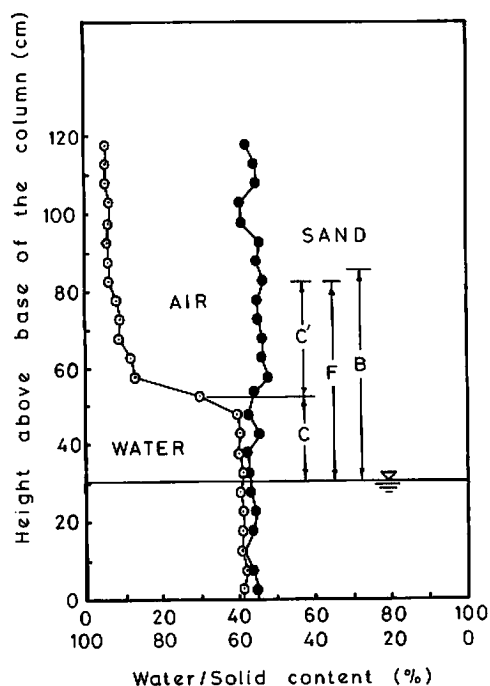
(3) 吸水実験

排水実験Ⅱの最終状態を初期条件として、オーバーフロータンクの水位を11.4cmから30.4cmへ上げ、この状態で28日間吸水させ、その間の全水頭の変化を測定した。その結果を第6図に示した。28日後においてもカラム内の地下水面は27.9cmまでしか上昇せず、オーバーフロータンクの水面と完全平衡には達しなかった。このことから、毛管上昇がきわめてゆるやかな過程であることがわかる。

第6図で全水頭はC、D、Eの各帯でそれぞれ異なる反応を示した。水位上昇前においては、B帯内では全水頭勾配はほぼ0であった。しかしそれより上では下向きの勾配が存在し、勾配が1.0よりも小さいことから、排水が継続していたことが読み取れる。オーバーフロータンクの水位を上昇させると、C帯内では直ちに反応が生じ、全水頭勾配がほぼ0の状態を保ちつつ、カラム内の地下水面の上昇とともに全水頭も増加する。D帯の上限は初期状態におけるB帯の上限に相当し、D帯内部ではオーバーフロータンクの水位の上昇とともに、毛管上昇による全水頭のゆるやかな上向きの勾配が形成される。しかし2～3時間後には勾配はほぼ0となり、その後はC帯と同じように挙動する。

E帯は上方へ向かってぬれ前線が移動する範囲である。上方浸潤開始前は排水が継続していたため、ぬれ前線の位置は各時間断面における全水頭の最小値の位置によって示される。その位置は時間とともに上昇し、吸水開始後6hrで最高値に達した。E帯の上限はぬれ前線が到達した上限と一致し、約2日後にE帯内の全水頭勾配はほぼゼロになり、その後はD、C帯と同じ挙動を示した。C、D、E帯をまとめてF帯と呼ぶことにする。すなわちF帯は約2日後に全水頭勾配がほぼ0になる部位であり、吸水過程による毛管上昇の影響範囲に相当する。図のようにF帯の高さはB帯のそれよりわずかに小さい。

吸水がほぼ終了した28日後に、残りの小カラムを分解して含水量を測定し、第7図を得た。第6



第7図 吸水実験後のカラムの3相分布

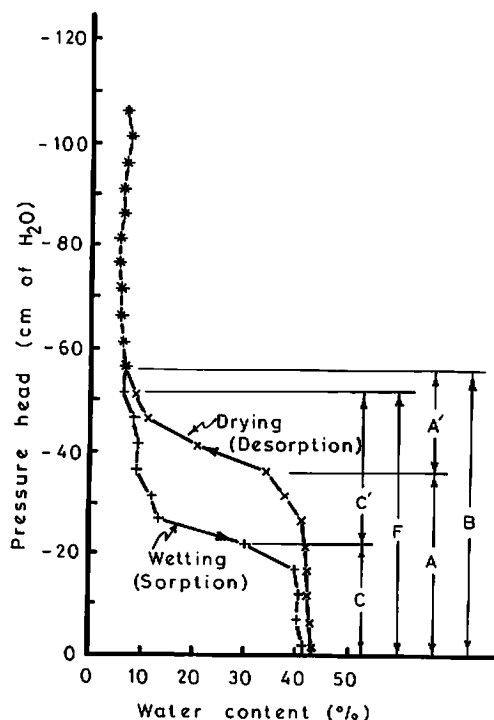
図のC、D、E帯の範囲を第7図と対比すると、各帯の境界は含水量プロファイルの不連続点に対応することがわかる。すなわち、Coreyの方法に従って空気侵入値と同じ方法で水侵入値を決定すると、その値は22cmH₂Oとなり、それがC帯の上限に相当する。つまりC帯は吸水終了後における“実質的に飽和した”部位である。ただしその含水量は封入空気のためA帯のそれよりわずかに小さい。D帯は含水量が急激に減少する部位にあたり、その上限には含水量の不連続が認められる。E帯の上限は毛管上昇の上限を示し、ここでも含水量の不連続が認められる。前述のとうりD帯の上限は初期条件におけるB帯の上限に相当し、この不連続はヒステリシスによるものであるから、その位置は条件次第で変化する。それ故、ここではD帯とE帯をまとめてC'帯と名づけてC帯と対比させることにする。

IV 考 察

カラム内の土壌が均質であると仮定できれば、

カラムの平衡水分プロファイルは、そのカラムを構成する土壌の水分特性を示すと考えることができる。本実験ではこの仮定はほぼ容認できるので第5図と第7図から、標準砂の水分特性のヒステリシスを示す第8図が得られる。この図のdryingは飽和状態からのdrying curveであり、またwettingはboundary wetting curve(Childs, 1969, p. 127)である。

前節で述べたとうり、第8図のA帯とC帯の上限はそれぞれ空気侵入値と水侵入値によって示され、これらの内部の毛管間隙は地下水と連続している水によって実質的に飽和している。そのため地下水面が変動すると、この部位の水頭は時間的遅れなしに地下水の水頭と同じ値に変化する。すなわちA帯とC帯は“実質的な飽和帯”と考えてもよい部位であり、負圧である点を除けば飽和帯の一部と考えることができ、例えば地下水の水平流動が生じている場合には、この部位でも地下水面下とほぼ等しい流束が生じる。また空気ポテン



第8図 標準砂の水分特性曲線

シャルの増加等によるわずかな水圧の増加によって、容易に正圧に変化する部位であり、地下水の涵養や流出過程において重要な役割を演じているものと予想される。

これに対してA'帯とC'帯は、それぞれA帯とC帯につづく実質的な不飽和帯であり、その上限は含水量の鉛直勾配が0になる点として示すことが出来る。すなわちこれらの部位では間隙の少なくとも一部が飽和帯と連続している水によって占められており、それらの連続毛管水系によって水圧の伝達が可能である。そのため排水時にはA帯やC帯とほぼ同じ挙動を示すし、降下浸透時には前述のようにぬれ前線がその上端に到達すると一斉的な水の移動が始まる。また地下水面上昇時には比較的短時間で上方浸潤の前線がその上限まで到達し、標準砂では約2日後にその内部の全水頭勾配がほぼ0になる。

以上の結果から、毛管水帯を地下水面から毛管上昇の限界高さまでと定義し、それを実質的な飽和部分と不飽和部分に区分することは、土壌水の運動を解釈する上で意味のあることが確認された。結論として、筆者らは第8図の各帯を、佐倉・谷口の方法に従って、B帯・F帯を毛管水帯、A帯・C帯を飽和毛管水帯、A'帯・C'帯を不飽和毛管水帯と呼ぶのが適当と考える。飽和毛管水帯は“実質的には”飽和しているが、“完全に”飽和してはいないので、厳密にはFreezeの提案のようにtension-saturated zone(張力飽和帯)と呼ぶほうがより適切であろうが、この部位の水文学的重要性を考えると、飽和という語に“実質的な飽和”という意味をもたせて、日本語では飽和毛管水帯と呼ぶほうが、不飽和毛管水帯との対比が明確になり、しかも混乱が少ないと考えられる。

なお本実験は毛管水帯の挙動に関する鉛直二次元砂箱実験の予備実験として実施したものである。鉛直二次元実験の結果については別の機会に発表する予定である。

終りに、実験装置の作成にご協力いただいた水理実験センターの小島監督官と工作センターの技官各位に

御礼申し上げます。

本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究（C）57580153（代表者 榎根 勇）の一部を用いて行ったものである。

文 献

- 科学技術庁資源調査所(1975)：水文用語集，資源調査所資料，34号，199 p.
- 榎根 勇(1980)：『水文学』大明堂，272 p.
- 酒井軍治郎(1965)：『地下水学』朝倉書店，418 p.
- 佐倉保夫・谷口真人(1983 a)：土壌水の移動特性に関するカラムを用いた降雨浸透実験，地理評，56，81～93.
- 佐倉保夫・谷口真人(1983 b)：地下水涵養機構における毛管水帯の役割(その2)，地理子，23号，188-189.
- 細山田健三(1966)：毛管帯を有する浸透に関する研究，佐賀大学農学部彙報，23号，43-144.
- 水収支研究グループ編(1973)：『地下水資源学』共立出版，397 p.
- ロージェ，A. A.(1963)：『土壌と水』東大出版会，138 p. (山崎不二夫監訳).
- Bear, J. (1979) : *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, 567p.
- Bouwer, H. (1978) : *Groundwater hydrology*. McGraw-Hill, 480p.
- Childs, E. C. (1969) : *The physical basis of soil water phenomena*. Wiley, 493p.
- Corey, A. T. (1977) : *Mechanics of heterogenous fluids in porous media*. Water Resources Publication, 259p.
- Freeze, R. A. and Cherry J. A. (1979) : *Groundwater*. Prentice-Hall, 604p.
- Hillel, D. (1971) : *Soil and water*. Academic Press, 288p.
- Lohman, S. W. and others (1972) : Definitions of selected ground-water terms — Revisions and conceptual refinements U. S. Geol. Survey *Water-Supply Paper*, No. 1988, 21p.
- Meinzer, O. E. (1923) : Outline of groundwater hydrology with definitions. U. S. Geol. Survey *Water-Supply Paper*, No. 494, 71p.
- Todd, D. K. (1980) : *Groundwater hydrology*. 2nd ed., Wiley, 535p.

水理実験センター報告第7号 正誤表

(誤)

(正)

p. 7 右 最下行

小島盛

小島豊盛