

- 6) Philip, J.R.: Soil Sci., 33, 5 (1957)
- 7) Staple, W.J. and Lehane, J.F.: Can. J. Agr. Sci., 34, 329 (1954)
- 8) Philip, J.R.: Soil Sci., 84, 2 (1957)

負圧浸透について

田淵俊雄（東大浸透ゼミナール）

負圧浸透についてとやかく論ずることは、今迄の多くの研究者たちの業績からだけでは到底できない。現在はまだ問題提起の段階にあるのが実状である。私自身もこの問題に首を突っこんでからわずか一年たらずで、実験資料もたいして持つておらず、文献もそれほど読んだわけではないので、負圧浸透についてはつきりした認識を持つまでには至っていない。しかし私たちの研究室で浸透ゼミナールを過去一年間続けてきた過程において、身につけた知識や考え方をもつてすれば、今後の浸透の研究に対してなんらかの示唆を与えることはできると思うので、つたない文章ながら浸透ゼミナールを代表して筆をとつた次第である。

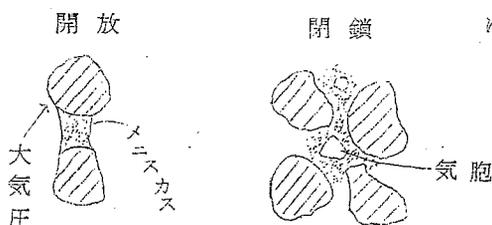
このようなわけであるから、負圧浸透を取り扱う際には、特に次のことに注意する必要がある。すなわち、常に現実の浸透の様相について思考し推察することである。また最初の目的としては、問題点をさがし出す建前から、「正圧浸透と負圧浸透と分けて考える必要があるのかどうか、これ以外にもつと本質的に浸透を分類するものはないのかどうか」をはつきりさせることにする。

1. 用語

最初にこれから用いる基本的な術語について説明する。

浸潤：一般に infiltration といわれているもので、水が地表から浸入したとき始まり、浸透前線が終端に到達した時終了する。終端とは土柱の底や自由水面などである。浸透：浸潤後のいちおう定常になつた状態の浸透をさす。飽和浸透試験のように、浸潤を経ない浸透もある。また時には、浸潤をも含めた意味で、一般的な水の流れを総称する場合に用いる。飽和：土壌の空隙が水のみで占められていること。不飽和：空隙中に多少なりとも空気が存在する。その空気の状態は気泡であつても、開放状態であつても良いことにする。開放：空隙中の空気が大気と通じていること。閉鎖：空

気が気泡やその他の形態で、土の中に封入された状態で存在する。



2. 従 来 の 研 究

第一に、今までの研究者たちの負圧浸透の取り扱い方について調べてみよう。

「負圧浸透」という言葉を最初に用いたのは山崎教授²⁾である。それによれば「正圧を呈する浸透を正圧浸透、負圧を呈する浸透を負圧浸透（又は毛管負圧浸透）と名付ける」であり、山崎教授の実験条件内であるという但し書きがついたとしても、ごく簡単な定義である。よつて、私もこの定義に従つて負圧浸透なる言葉を用いてゆくことにする。

外国における研究には、浸透といつても infiltration についてのものが多い。Bodman, Colman, Miller, Philip, などのものがそれである。infiltration は前進毛管膜が存在しているから負圧浸透をとまなうはずである。だが彼らの研究は負圧浸透の特質について論じたものではなく、単に含水量分布やテノンシヨメーターを用いて水圧の測定を行つているにすぎない。彼ら欧米の研究者たちの理論は常に毛管ポテンシャル説に裏打ちされている。この毛管ポテンシャル論の基本的な定理は「含水量と水圧（負圧）が一価関係にある」ということである。Child や Richard は浸潤に限らず浸透についても研究しているが、浸透の様相について詳しく分析したものではない。Child-George は浸透係数が含水量の一価関数であるとし、孔隙分布から含水量と浸透係数との関係を求めることを、ある仮説を設けて行つている。ソヴェトのブダコフスキー⁵⁾ は浸潤及び浸透両者にわたつてかなり有用な研究を行つている。彼の論文の中でわれわれの問題点に関係しているものは「1. 浸透係数は含水量の一価関数である。 $\alpha/\alpha_0 = m^4$ α_0 : 飽和浸透係数, m : 飽和度。2. 浸潤強度 $q = \alpha \left(1 + \frac{h_0 + h_k}{y} \right)$ h_0 : たん水深, h_k : 前進毛管力, y : 浸透前線から地表までの長さ、3. 下層が上層より浸透性が良い場合、浸透前線が下層を通過する際には一定の浸透流量と深さ方向に一定な含水量の分布が定まる。その浸透性の差が著しいと圧力伝達は不可能になる。4. 浸潤と浸透の間には本質的な変化はなく、浸潤の際定まつた浸透係数は浸透

段階にも連続的に引き継がれる。」である。彼は浸透の様相について考察はしているが、正圧—負圧の分類を意識的に行つてはいないし、圧力伝達が不可能になるような限界状態の含水量や負圧について触れてもいない。

我が国においては、第一に昭和18年の山崎教授¹⁾の研究がある。これは水を一度毛管上昇させた後に降下浸透させる実験である。山崎教授はこれを毛管浸透と名づけて浸潤と区別しているが、この浸透過程で生ずる負圧の原因については混乱していて、はつきりしていない。引用すると「包気帯における浸透においては土壤空隙中に空気が多量に含まれ、土壤毛管中を運動する水は至るところ空気に接し、極端な場合にはあたかも毛管水膜で囲まれた管内に水が流れるような状態となり、毛管水膜の毛管力のため常に負の圧力水頭を生ずる。このように毛管力の作用をうけ負圧を生ずる浸透を特に「毛管浸透」と名づけ、通常の浸透と区別することにする。すなわち乾いた土中に水がしみこむ場合のように前進毛管膜を生じ、重力と共にこの毛管力をも動力として運動する現象を「毛管浸潤」と名づけ毛管浸透と区別する。」

次いで出された昭和23年の山崎教授²⁾の論文になると、浸透の様相がかなりはつきりしてきており、「水頭勾配 J が1より大きく、かつ1に余り近くない限り、その層全体が正圧浸透をしよう、一部正圧浸透一部負圧浸透をしよう、全層負圧浸透をしよう」と浸透係数は一定である。「 $J > 1$ で浸透水が空隙中を満流すると考えられる場合を閉鎖浸透、 $J = 1$ で浸透水が開放毛管膜（外気と連絡した空気との間にできる毛管膜）をもちつつ流下すると考えられる場合を開放浸透と名づける。」 $J = 1$ になるために必要な最小の負圧を限界負圧と名づける。」と、なつている。すなわちある限界負圧以下にならない限り、開放浸透にはならず、閉鎖浸透の場合には負圧であろうと正圧であろうと流れに質的な相異はない。限界負圧以下では $J = 1$ であり開放浸透である。

第三に富士岡氏³⁾の論文がある。氏は「土壤中の空隙が水で満たされていないで空気が残存すれば、土壤の毛管中を流れる水は空気と接して、その界面に毛管膜を形成し負圧を発生する。」とし、かなりはつきりした条件の中で、土壤の毛管中で不飽和であれば負圧であるという結論を出している。そして負圧の原因、すなわち不飽和になる原因は土壤の毛管の不規則性にあるとしている。

第四に田町教授⁴⁾の論文によれば、浸潤と浸透は区別され、前者は毛管下降浸潤、後者は垂直下降次元浸透と名づけられ、「毛管下降浸潤の浸潤先端が地下水面に到達すると、毛管圧により地下水面の水は一時吸い上げられるが、やがて平衡状態に達し、下降毛

管膜は全く消失し、土層内の浸透は重力のみの作用による垂直一次元浸透となる。」「毛管下降浸潤と垂直下降浸透とを比較すると、前者においては伝導部の各点の含水量及び圧力（負圧）が等しく、位勢傾度（水頭勾配）は位高傾度（位置のポテンシャル勾配＝1）に等しい。ただし間隙は飽和状態になく空気を多く含む故に、伝導度が小さく、また浸潤が進むに従つて浸潤先端の空気圧が増し、そのために浸潤速度が減ずる。後者においては、間隙は飽和状態にあつて含水量は当然等しいが、圧力は等しくなく、一部では正圧であり、一部では負である場合もあり、位勢傾度は一定であるが、必ずしも位高傾度と等しくない。」と述べられている。

3. 負 圧 浸 透

以上、見てきてわかるように、現在までに負圧浸透なるものはかなりの混乱の中をくぐり抜けてきている。たとえば富士岡氏の論文に現われているように、あたかも、不飽和＝毛管膜＝負圧～負圧浸透、正圧＝飽和、なるが如き印象をすら与えているような時もあった。しかし、不飽和＝毛管膜、毛管膜＝負圧では決してない。不飽和であつても、空気が気泡の状態に含まれていれば毛管膜はできない。又たとえ毛管膜ができていても、それに接している空気が閉鎖状態で空気圧が高ければ負圧になるかどうかは不明である。さらに負圧であつたとしても、それが流れに対してどんな質的变化をもたらすのだろうか。それとは逆に、負圧であれば毛管膜があるかといえば、これも一概に断言できることではない。たとえば飽和浸透の時に適当な成層状態にしてやれば、負圧は任意に作ることができる。こうなつてくると、負圧を呈する浸透が、他の浸透と区別して特別に研究するだけの特殊性をもつていないということになる。そして、これに代るものとして登場するのが、山崎教授の研究によつて示された開放浸透、すなわちその部分の水圧（負圧）によつて内部状態が顕著に変る浸透である。開放浸透の場合には、不飽和＝毛管膜＝負圧は絶対的に成り立っている。だから開放浸透は従来の負圧浸透のうちの特殊性を持つている一部分といつてもさしつかえない。

4. 開 放 浸 透

では、なぜ開放浸透をこどさら取り上げなければならないか。この点について少し詳しく述べてみよう。閉鎖浸透の場合には、たとえ不飽和であつても、その中の水圧がいくらであろうと浸透の様相にはほとんど変動をもたらさない。もちろん水圧と気泡内空気圧との釣り合いで、気泡の容積はいくらか変動するのがその含水量は開放浸透の如く負圧の大きさによつて顕著に変化することはない。又、さらに重要なのは、その

負圧発生原因が閉鎖状態の内部空気に接する毛管膜によるのではなくて、浸透条件（たん水深や浸透終端の状態）や浸透係数の分布によつてゐることである。だから、ある部分がどんな水圧をもつかはその部分だけの状態（例えば含水量）では定まらないのである。故に含水量と水圧とは一箇関係にはなり得ず、正圧であるから飽和であるとか、含水量一定だから等圧であるとか、いうことはできないのである。

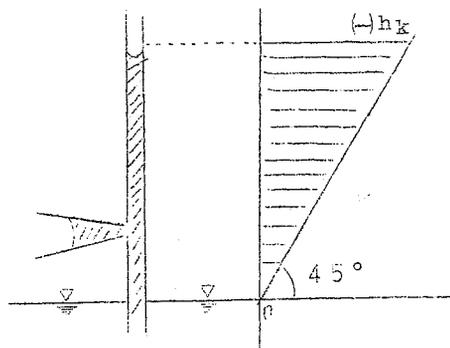
ところが開放浸透の場合には毛管膜が浸透に影響する。山崎教授によれば砂による実験ではあるが限界負圧 $J=1$ —開放毛管膜—開放浸透であつた。この一連の組み合わせを良く考えてみる必要がある。 $J=1$ ということ、すなわち負圧が一定値を示すということこれは均一層の閉鎖浸透の場合には全く姿を現わさなかつたことである。

次に毛管ポテンシャル論について少々触れておこう。毛管ポテンシャル論においては含水量と水圧（負圧）は一箇関係であるとされている。土中の状態において水圧と共に一義的に変化するものとしては毛管膜の曲率しか考えられない。とすれば水圧と共に変化する含水量は毛管膜の変動範囲に存在する。故に毛管ポテンシャル論の成立するのは、土中の空隙中で毛管膜が変動できる含水量の場合（おそらく開放状態であらう）である。このように考えると、 $J=1$ とはかざらないが、毛管ポテンシャル論を適用している場合は開放浸透の一つである。このような開放浸透の問題点を解明するには、開放毛管膜のある状態の水の運動、限界負圧附近の圧力水の土中でのあり方について知ることがせひ必要となつてゐる。

5. 浸 透

そのためには、いま一度もとへ戻つて現実の浸透の状態をはつきりと認識することが重要である。こゝで一つ一つ順を追つて考察してみよう。

毛管上昇について 一本の円筒を自由水面に垂直に立てたとする。水は円筒壁との付着力によつて上昇運動を起し、水の凝集力との釣合によつて曲面（毛管膜）が形成される。故に毛管膜の水側においては $2T/r$ なる負圧を生じ、自由水面との間に水頭勾配 $J=1+\frac{hk}{l}$ （ hk/l は -1 より小さく J は負になる）を形成する。この時、毛管膜の曲率が変化しないならば hk は常に一定であり、毛管上昇は $J=0$ になるまで続く。故に毛管上昇は壁面との附着力によつて起るが、その後の水頭勾配や上昇高は形成された毛管膜（前進毛管膜）の負圧によつて定まつてゐる。又、その水柱の途中の水圧は、運動中は前進毛管膜の負圧と自由水面及びhead lossの分布によつて定まり、停止後は自由水面からの高さによつて定まつてゐる。もしも円筒の途中に穴をあけラツパ状の毛細管を水平に取りつけたとすれば、その点の水圧はあくまでも以上の述べたことによつて定まり、



ラツパ状毛細管にできた毛管膜によつて定まるのではない。ラツパ状毛細管においては、そこで定まつている水圧に釣合う毛管膜の所で水は静止し毛管膜を形成しているのである。

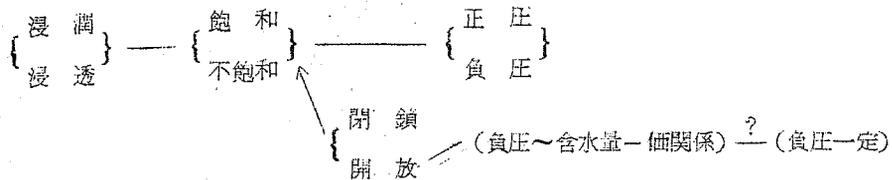
浸潤について 地表水はたん水深 h_0 による正圧と重力と前進毛管膜による負圧とを受けて下降運動を起す。故に地表においては正圧 h_0 であり、浸透前線では前進

毛管膜の負圧 h_k である。 湿潤部の水圧はこの両圧力の条件の下で、head lossの配分(浸透係数の分布)により定まる。たとえそれが封入された気泡を含まうが、かなりの量の閉鎖空気を含もうが、途中に発生した毛管膜によつて圧力が左右されることはない。但し、これは一次元浸透の閉鎖浸透の場合であつて、水路底からの降下浸透のような二次元浸透や開放浸透の場合には少々話が違つてくる。二次元浸透の場合には、側面の毛管膜も前進毛管膜となつて浸透前線を形成する。しかし、この場合は浸透前線が側方にもできたということだけで、湿潤部内部については前の場合となんら変りはない。だが、湿潤部が開放状態である場合は少々毛色の違つたものになる。山崎教授によると $J=1$ 、負圧一定と、今までとは全く違つたことによつて、その水圧が定まつているのである。内部空気が開放であるとは、一体どんな状態なのだろうか。自然の土壌や砂の空隙を考えれば、それはかなり少ない含水量の状態であろうと想像される。浸潤の際にそのような状態になるとすれば、それは上部よりの給水がよほど少ない時に起る現象であろう。この場合に水はどのような形態で存在し得るだろうか。第一に一本の毛細管が水で満たされ、隣りの毛細管が空気でお占められ、また隣りが氷-----という考えがある。だがこの考え方は実際の空隙のあり方を考えれば非常に不自然である。なぜなら、空隙は細くなつたり太くなつたり枝分れしたりいつしよになつたりしているからである。又このような水の存在形態であると、全ての内部空気が開放状態にあることはほとんど不可能であろう。第二に考えられるのは、水が空隙を満たすほどではなく、土粒子に附着して連続的につながつて流れている状態。第三にもつと水量が少なく、土粒子と土粒子の接触点附近にリング状に附着している状態である。このような水の運動状態については、後の機会に詳しく推察することとして、次の浸透段階について考察を行うことにする。

浸透について 前にも述べたように、浸潤が浸透に移ると、前進毛管膜が停止し（消滅し）、浸透がいちおう定常的になる。すなわち浸透前線が浸透終端（地下水面や土柱の底）に到達し、浸透距離 l は一定となる。そこで湿潤部では浸潤が浸透に変つたからといって急激な変動が起るだろうか。浸潤と浸透の両段階にDarcyの式が連続的に成立するかどうかは、一つの大きな問題であり、今後の研究によつて明らかにしなければならぬことである。しかし、私はいちおう連続的なものであると考えている。そうすれば、問題になつてくる点（開放浸透 $-J=1$ ）は、浸潤、浸透両段階において共通のものとして考えて良いであろう。

6. む す び

以上、述べてきたことを総括すると、



であつて、それぞれのグループは独立で、飽和=正圧とか不飽和=負圧とかいつた関係は全くないことがわかつた。ところが開放浸透の場合にのみ例外的な特殊性があり、また疑問も多く残されている。すなわち含水量が水圧と一価関係にあること、必ず負圧になることである。だが〔開放浸透 $-J=1$ （負圧一定） \sim 水の流れが不連続か連続か \sim 毛管膜の負圧の作用〕については、まだ研究の余地があり、はつきりと断定できないのが現状である。

以上によつて、正圧、負圧と云う分類のし方で浸透を区別して考えることが当を得たものではないということが明らかになつた。

開放浸透の機構の解明ということは今後の大きな課題であるがそのほかにも例をあげれば浸潤のメカニズム、浸潤と浸透の両段階の関係、浸潤時の含水量分布、成層土層での層の境界における水の動態、浸透時の内部状態の変化、初期含水量と浸透との関係などがある。

また、開放浸透の際の水の存在形態の研究と関連して、前進毛管力、毛管上昇力、限界負圧力などの関係を空隙の状態と共に研究することが必要である。

このように、「自然状態のいかなる土層についても浸透の状況を解明する」という目標に到達するまでにはなお数多くの研究を必要としている。一人でも多くの研究者、技術者がこの問題に関心を寄せられることを希望する次第である。（1959, 1, 27）

文 献

- 1) 山崎不二夫：
土壤の急降下毛管滲透の負圧について、農土研 15巻1号(1943)
- 2) 山崎不二夫：成層土壤降下浸透に関する研究、東京農専学術報告 第1号(1948)、研究の資料と記録 第6集(1958)
- 3) 富士岡義一：土壤の鉛直降下浸透における負圧発生機構1、農土研 21巻6号(1954)
- 4) 田町正督：土壤及び堤体内における浸透に関する理論的考察、九大農業工学研究資料第51号(1957)
- 5) Budakovskii A.I. : Vpityvanie Vody v Pochvu,
土壤中への水の浸透、(1955)(近いうちに訳本出版予定)
- 6) Childs and Collis-George : The permeability of porous materials, Proc. Roy. Soc. A 201, P392 - 405
- 7) Bodman - Colman : Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 8, 116 - 122; Moisture and energy conditions during downward entry of water into moist and layered soils, ibid., 9, 3 - 11.
- 8) Richard : Capillary conduction of liquids through porous media. Physics, 1, 318 - 333
- 9) R.D. Miller and F. Richard : Hydraulic gradients during infiltration in soils, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 16, No. 1 (1952)

地下水流動の水文学的計算

金子 良 (農技研)

降水の一部は地下水補給となり、地下水補給は地下水へ到達して地下水位を上昇させるが、また地下水位は上下流の地下水流動にも影響されるので、任意地域、任意期間について次式の関係が成立する。

$$P = (D_2 - D_1) + E + G + M \text{ ----- (1)}$$