

地下水現象への土壌物理学的接近

木 村 重 彦*

飽和粘土内の流れが非ダルシー流になることは土壌物理学の分野で、十数年前にとりあげられ、その後この立場はシルト層の流れにも波及された。しかし、非ダルシー流そのものの確認や実態解析については多くの反論があり、未だ定説とされているものはない。また、砂層や砂レキ層の飽和浸透流については、当然ダルシー流とされている。

しかるに、最近野外で実証されてきた地下水流の実態は、その殆んどが従来のダルシー流で解析することがむずかしく、しかも、非ダルシー流的な考え方にたつと非常に満足に解析できることになった。これらの実態と解析結果について、ここに概略的な内容紹介を行なうものである。

I. は し が き

地下水は安易で低コストの開発可能水源として着目され、最近数20年間にその利用量は指数的に増加した。このため、わが国各地で過剰揚水による地下水位の低下、湧水の涸渇、海岸地域帯水層への海水浸入、沖積平野での広域地盤沈下発生、都市地域井戸からの酸欠空気上昇などという数々の異常事態を招いた。これら異常事態を招くほどの大幅な環境条件の変化は、地下水流に関する諸因子の軽重やそれらの特徴を明瞭に描き出した。とくに近年高度に発展した地下水の地域的水収支シミュレーション法や放射能利用の地下水流実証法などで示された地下水流の特徴的現象は、ダルシー則を基礎に、 $\nabla^2=0$ とした数学的積み重ねに偏重した従来の地下水流解析法に対し、根本的反省を余儀なくさせるほどの事態を招いている¹⁾。

ここでは、見出された地下水流の特徴的現象を紹介するとともに、それらの現象に対する土壌物理学的思考方法の有効性についてふれてみることにする。

II. ダルシー則の抜け道 ——地下水流はすべて非ダルシー流ではないか——

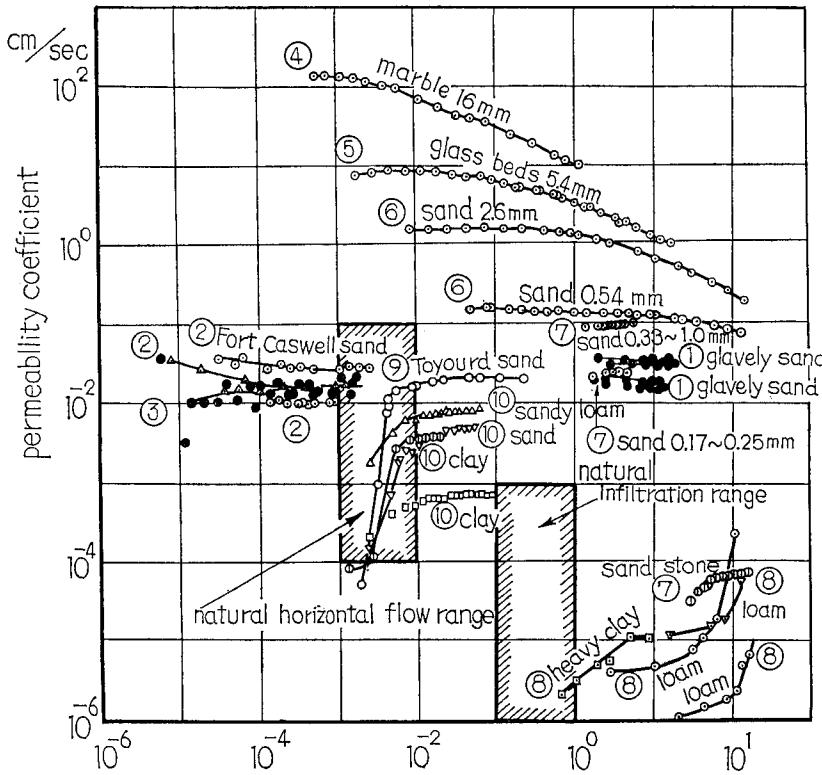
地下水流理論の基礎とされているダルシー則は、細砂のような多孔性構造と石灰岩層のようなきれつ性構造の

いずれにも適用できる²⁾。このことは、流路に曲折さえあれば、有効空ゲキ率とは無関係に、断面的流量が動水勾配の1次関数になるという非常に内容の広い一般則である。しかし、それは現実の地下水流解析に万能選手となるだろうか。

地下水資源を評価するときに、有効空ゲキ率の大小と循環水の実流速とは停滞水量と循環水量を定める基本因子となる。このため、新しい方法を使ってこれらの真の値を追求してきた。その結果、多孔性構造の有効空ゲキ率は室内試験と野外試験で全く違う値になることが明らかになってきた。地下水流動の対象層とされている砂層や砂レキ層の室内透水試験によると、追跡子の示す平均流速はみかけの平均流速よりわずかに速く示される³⁾。よって、有効空ゲキ率は空ゲキ率よりわずかに小さいことを理解することができる。しかるに、わが国各地の地域的地下水流動を水収支シミュレーション法で解析してみると、有効空ゲキ率は空ゲキ率の数%~十数%にすぎないことが見出されてきた^{4)~6)}。この事実はまた、わが国を含めた世界各地の野外試験で、人工の放射性追跡子や水に含まれているトリチウム濃度ピーク(注2)を指標に求めた地下水流速が、揚水試験結果から求めた値より約1桁大きくなるという事実からも裏付けられる⁵⁾。

このように室内と野外で有効空ゲキ率にかなり大きな差異が存在している原因を、既往の透水試験結果の中に求めてみよう⁶⁾。図-1の斜線部分はわが国の帯水層が与えられている条件範囲で、左が透水層の水平流動、右が難透水層の垂直浸透範囲である。図面上部の④~⑥の実験値は、従来から認められている乱流領域での透水係数変化例である。そして、動水勾配に関係なく透水係数が一定になるというダルシー領域は、図から明かなように、わが国の帯水層が自然条件で与えられている動水勾配範囲よりも、はるかに高い値で示される現象となる。しかも、既往の室内実験のほとんどは、このダルシー領域で実験されていた。この室内実験の有効性の根拠のひとつにされた実験例が図の左に示してある。しかし、これは径がわずか1cmで、長さが1mもあるU字管に砂をつめた実験のため、壁面の影響が大きく示されたものではないだろうか。そして、わが国の帯水層条件に

* 農林省農業土木試験場 (1972.8.31.受理)



図一 hydraulic gradient

実験者：①Darcy (1856), ②Meinzer and Fishel (1934), ③Fishel (1935),
 ④don Kirkham (), ⑤Brownell and Katz (1947), ⑥Ahmed and Su-
 nada (1969), ⑦King (1898), ⑧多田 (1965), ⑨根岸 (1972), ⑩長田 (1966),

図一 既往の室内実験で示された動水勾配と透水係数の関係

近い実験例では、動水勾配の減少とともに透水係数が急激に低下するという非ダルシー現象の領域になることが、土壌物理研究者達の実験で示されている。

よって、一般的室内試験と野外試験との有効空ゲキ率の差異は、後者が前者より1桁も低い動水勾配のために生じた非ダルシー流の発生を実証したものであり、土壌物理研究者達の室内試験で示された動水勾配の減少による透水係数の急激な低下現象は、野外試験結果からみて、有効空ゲキ率の急激な低下がその大きな要因になるものと考えられないだろうか。もしこれが事実ならば、地下水学は根本からやり動かされることになってくる。

では、何故今までダルシー則が適用できたのであろうか。野外の地下水流評価の基礎とされてきた揚水試験では、井戸周辺の地下水流すなわちダルシー領域の地下水流に対する透水係数を求めることになる。この透水試験や従来の室内試験というダルシー領域の透水係数を用い、しかもダルシー則で地下水流が評価できた理由のひとつは、自然条件の動水勾配変動が非常に小さいということにある。このため、透水係数はほとんど変化しない

ので、ダルシー則が有効空ゲキ率に無関係という特徴から、この法則の適用を可能にしたのではないかと考えられる。揚水試験や一般の透水試験で求めた透水係数の値は実際の値より数倍大きくなる。しかし、この程度の誤差は、自然の地下水流を大幅に変化させるような人為条件が与えられず、ししも地下水流を実証できなかった以前の段階では問題にならなかったのではないかと。そして後述の理由から、この水平流動への過大評価と過信が今日の地下水に起因した異常事態を招く大きな要因になったともいえるのではないだろうか。

Ⅲ. 地下の自然水流は、すべて始動勾配に近い条件にあるのではないか。

地下水流評価の基礎とされてきた揚水試験の理論としては、当初揚水で生じた水位低下の影響範囲

である影響圏を揚水井から一定距離までと考えた平衡式を用い、影響圏に300~500mを代入していた。その後、影響圏は経時的に無限に拡がるという非平衡式に進展した。それは、地下水流をニュートン流と考えたとき、当然のことになる。しかるに、武蔵野台地で数多くの揚水試験データを検討した結果、非平衡式よりも平衡式を適用した方が妥当性が高いという傾向が見出されてきた⁷⁾。このように影響圏が比較的短距離で落ち着くという現象は、地盤沈下地域でも沈下範囲が揚水井から1~2km以内の短距離に限られるという現象として示されている。よって、地下水流は粘性流動とみなせるのではないかと。そして自然条件の地下水流は始動勾配に近い値にあるのではないかと考えられてくる。また、前述のように、透水層の有効空ゲキ率の値が非常に小さいことも自然の地下水流が始動勾配に近い値になることを裏付けるものにならないだろうか。

次に不飽和帯の垂直透浸についても興味深い事実が見出された。一般的に自由地下水面は降水後2~3日で上昇することが多い。これは、降水が不飽和帯の空ゲキ部

分を2~3日かけて透過し、地下水面に到達するものであり、事実、不飽和の透水試験値からも、これを裏付けられるとされてきた。しかし、実際に野外で不飽和帯の水を深さごとに採取し、水中に含まれているトリチウム濃度(注2)を測定してみると、それは降水のトリチウム濃度の経時変化と、非常によく一致している⁸⁾。そして、その透浸速度はドイツの砂質ロームで1~3m/年⁸⁾、米国のシルト質ロームで0.2~0.4m/年⁹⁾、相模原台地ロームで1.45m/年⁹⁾という従来よりもはるかに遅い速度になることがわかってきた。

これらの事実から、地下水面上の不飽和帯の水分は作用としての重力と反作用としての化学ポテンシャルとのバランスがとれた連続系の中で静止している。そして、降水という重力増で、そのバランスがくずれ、結合水を除くすべての水が下方に押し出されるような流れとなる。したがって、気泡が存在しても、これを伝わる流れというものは、きわめて表層の範囲以外には存在しない。そして、降水後2~3日で地下水面が上昇する現象は、不飽和層内の水の重力伝播速度を示すというように考えられてくる。最近、かんがい水量と地下水面の相関性が問題にされてきたことも、これを裏付けるものでないだろうか。

以上から自然状態の地下水も不飽和帯の水も、基本的にすべてが重力と化学ポテンシャルとのバランスがとれたひとつの連続した静止系として存在し、降水の透浸によるバランスの乱れで、すべてが始動勾配に近い流れを生じているということになる。これはきわめて当然の考え方である。しかし、現実の現象解析では、第1にこの静止状態から流動状態への現象解析が不十分でなかったか、第2に、地下の水を一つの連続する系としてとらえずに、水平流のみ、あるいは垂直透浸のみという断片的把握に終わったことが、現実の現象解析を不十分にしかかったという問題が残されることになる。

IV. 揚水による地下水流の変化

これら二つの問題点、そしてIIで提案した自然条件の地下水流が非ダルシー流であるという考え方の是非は、揚水という人為条件が加えられたときの地下水流の変化状態の解析で明確化されることになった。

まず第1の地下水流動現象の問題である。トリチウム dating 法(注1, 2)で実際の地下水流を解析してみると、自然の帯水層中にはトリチウム濃度がほぼゼロという約100年以前の降水すなわち停滞水が、非常に大量に存在していた。そして、揚水という人為条件が加えられると、この停滞水が帯水層から引き抜かれて循環水化するという現象が見出されてきた^{5,6)}。しかも、この自然

状態の停滞水が循環水化する現象は、揚水量がかなり少ない場合にも発生し、揚水量の増加とともに増大して、遂には揚水のほとんどすべてが自然状態の停滞水で占められるという状態さえも存在していた^{5,6)}。

このように、動水勾配の増加で有効空ゲキ率が増加する現象は、前述の考え方から、室内実験で求められた動水勾配の増加で透水係数が増大するという非ダルシー流を裏付けるものにならないだろうか。また、揚水とともに自然状態の停滞水が引き抜かれるということは、揚水で地層収縮が生じ、地盤沈下が発生するという事に結びついてくる。これは従来、ダルシー則で評価できなかった地盤沈下問題を、初めて地下水流に直接関係する問題としてとりあげることになる。

つぎに第2の地域的地下水流の問題である。揚水による地下水流そのものの変化も従来の考え方と非常に異っていた。従来の考え方によると、透水層からの揚水で生じた水位低下を補うものは、周辺地域から透水層を通る水平流であった。しかるに、トリチウム dating 法の利用で実証された状態は、全く異っていた。揚水による地下水流の変化は、水平流動、垂直浸透のいずれにも影響を与えていた。しかもそれらを量的に検討すると、透水層の水平流量の増加は非常に少なく、供給される水量の殆んどは垂直浸透で補われていた。そして、透水層上部がシルトや粘土層のような難透水性地層の場合には、垂直浸透量に占める層内からの停滞水引き抜き量の比率が大きくなり、しかもこの引き抜き量にほぼ相当する地層収縮が生じて、これが地盤沈下現象となっていた⁶⁾。

このような現象を土壌物理的にみると、それは少しも異常とはならない。揚水による水位低下が招く水平流と垂直流との動水勾配変化率は明らかに後者が大きい。そして、流動面積もわずか数m厚さの水平流動面積より、平面的に広がる垂直浸透面積の方がはるかに大きい。これらの理由で水平流よりも垂直浸透量が大きくなる現象を理解することができる。また、地層収縮問題に対しては、動水勾配の増加で有効空ゲキ率が増加するが、圧力伝導速度が遅いので、空ゲキ内の流れは急激な地下水位変化による入口のない流れ、すなわち、しぼり出しの流れを招き、これが地層収縮を生ずると説明できる。したがって、今後は、このような土壌物理的現象を把握した上での地域的地下水流という考え方が、現実の地下水流問題解析法の主流となってくのではないだろうか。

V. 地下水流は水みちの流れ

——ビンガム流の仮説——

揚水中のトリチウム濃度解析によると自然状態では帯水層空ゲキのほとんどが停滞水で占められ、残り数%の有効空ゲキ内を循環水が流動していた。この有効空ゲキ

内の流れが水みち的なものであることは、炭素-14 dating (註1) 結果にも示されている。炭素-14は地層中の炭素と置換するため、dating 解析が非常にむずかしいことが基礎実験で実証されている。しかるに、野外の炭素-14濃度を測定してみると、地層中の炭素と殆んど置換されていない¹⁰⁾。これは、循環水が水みちの流れであり、他の水や地層と反応しにくい条件にあることを示すものでないだろうか。そして、また自然の流れが水みち的であるという事実は、地層を掘き出したときに必ずみかける現象であり、それはまた、ダルシー則では説明しにくいものであった。

では、次に有効空ゲキ内の流れをどのように理解したらよいだろうか。トリチウム dating 法の測定結果を見ると、地下水のトリチウム濃度はどのような地層であっても、それは降水のトリチウム濃度と同じ傾向の経時変化を示していた⁵⁾。これは、最近における降水の循環系がどのルートを通っても同じ時間にその点に到達するという予想もしなかった事実を示したことになる。もし、それぞれの水みちの距離や混合・分散による流速に変化があれば、このような現象は生じない。このような条件を満足する流体として、筆者はピンガム流体を仮定してみた。そうすると、栓流の特徴から一定の動水勾配では、一定の直径以上の空ゲキでなければ水が流動しないこと。混合・分散は Hagen-Poiseuille の流れよりはるかに少なくなる。そして、動水勾配の増加とともに流動できる水みち径が段々小さくなり、有効空ゲキ率が增大することなど、実際の現象を満足できることになる。そこでこのような立場から、多孔性構造に対する一つの流れモデルをたてて、簡単な数式展開をしてみると、これまでのべた地下水流の諸特徴のすべてを満足するようなモデルになり、また、それは野外でのトリチウム濃度による地域的地下水流の解析に有効に利用することができた。

VI. む す び

以上のように、最近見出された地下水流の諸現象は土壌物理的観点にたつと非常に容易に理解できるものであった。しかも、この考え方にたつと、現在地下水学で問題となっている塩水浸入や人工地下水注入などの障害原因を明らかにし、その対策上の指示を行なう可能性もある⁵⁾。提案した考え方は、まだきわめて幼稚でマクロな把握にすぎない。しかし、今後の土壌物理的観点にたった現象把握法の進展によって地下水学が飛躍的に進展されるだろうことは、疑がないのではないだろうか。

(註1) Dating 法: 1947年に Libby が提案した。原理は提案当初より拡張解釈され、今日では次のようになってい

る。すなわち、自然状態の地下水流中に極微量混入している放射性物質の濃度変化は、その物質の放射性減衰にしたがう。よってその物質の地下水混入時点の濃度が既知ならば、地下水混入後の経過時間は任意地点の地下水中の微量物質の放射線強度の測定値から求めることができるというもの。利用物質としては降水に混入されているトリチウム、炭素-14、ナトリウム-22、シリカ-32、などの外に地中の岩石から溶出するウラン、トリウム系列の諸元素などがあげられている⁵⁾。

(註2) トリチウム dating の手法: トリチウムは水素の同位元素で、化学記号を T で表わすと、水の中に HTO という分子形で必ず含まれている。トリチウムは半減期約12年でベータ線を放出するので、今日の放射線測定技術によると水中のトリチウム濃度を 10^{-14} ppm という低濃度まで測定することができる。自然状態における降水には太陽から直接飛来したり、太陽や宇宙から飛来する放射線と大気圏のチッ素原子との核反応で生じたトリチウムが約 10^{-13} ppm の濃度で含まれていた。このため、dating 法の原理から、地下水のトリチウム濃度測定によって、約100年前までの降水期間についてはその降水時期を求めることができる。しかし、1952年以降の大気圏における水素爆弾実験で発生したトリチウムが地球全体を汚染し、降水中のトリチウム濃度を最大約100倍としてしまった。現在でもわが国の降水は自然状態の約10倍の濃度を示している。このような人為汚染を受けることになったが、この期間の降水のトリチウム濃度は降水ごとに個々の濃度を示すので、降水のトリチウム濃度経時変化を指標に解析すれば、地下水における最近20年間の降水の地下水浸透状態も求めることができる。また、通常物質で潜水層中の地下水流動を追跡する場合、イオン交換や吸着反応の影響が大きく示されることになるが、トリチウムはそのような影響を殆んど考慮する必要がない。このため、トリチウム濃度分布の経時変化から地下水流動が実証できることになる。このように地下水のトリチウム濃度の dating 能と理想的追跡能との両者を利用することによって、地下水流の実態が解析できるようになった。

参 考 文 献

- 1) 山本荘毅: 日本における地下水の開発に関する諸問題と保全について, 科学技術庁資源調査所資料, 防災373, 地盤48, 3~4. (1970)
- 2) クリメントフ, プイハチエフ: 地下水の力学, 外尾・永井訳, ラティス (1967), 25. (1961)
- 3) 木村・他3名: 人工の放射性追跡子による地下水の流れの研究, 農土試報7, 91~118. (1969)
- 4) 柴崎達雄: 広域地下水開発とその管理, 現代日本の地下水研究, 25~39. (1970)
新藤・柴崎・鎌田: 関東平野における地下水の酒濁, 日本地質学会第79年学術大会, 地盤と地下水に関する公書, 7~17. (1972)
- 5) 木村重彦: 水中のトリチウムによる地下水の流れの研究

- (I), 農土試報9, 1~45. (1971)
- 6) —: 同上 (II), 農土試報10, 1~42. (1972)
- 7) 細野義純: 武蔵野の地下水, 東教大 hidrologie 談話会 (1967)
—: 武蔵野台地の自由地下水—とくにその変動の性状について, 地質学会大会 (1968)
—: 武蔵野市吉祥寺における揚水実験資料, 消防研技術資料2, 1~101. (1969)
—: 武蔵野台地における帯水層の性状に関する調査資料, 同上3, 1~205. (1970)
- 8) Zimmermann, U. D. Ehhalt and K. O. Münnich : Soil-water movement and evapotranspiration ; Changes in the isotopes composition of the water, I. A. E. A., Vienna-Austria, SM-83/27. (1967)
- 9) Schmalz, B. L. and W. L. Polzer ; Tritiated water distribution in unsaturated soil, Soil Sci. 108, 43-47. (1969)
- 10) Geyh, M. A : Carbon-14 concentration of Lime in soils and aspects of groundwater' Isotope Hydrology 1970, I. A. E. A., 215~223 (1970)