

不均一場の認識と地下水流動系

小 前 隆 美*

10年以上も前のことである。環境庁(当時)のプロジェクト研究予算を獲得し、不均一場の地下水流動と汚染の広がりに関する研究をした。研究に外部評価が導入され始めた頃で、環境庁において成果発表と評価の場が設けられ、私たちの研究成果にも3名の評価者が付いた。成果発表が終わると、「スケールの問題ですね。」と一人の評価者が発言した。

研究成果はビーカーレベルの実験で得た多孔質球体内外の流れ、室内モデル実験で得たフィンガーリング現象、野外実験で得た旧河道中の高速な流れで構成され、人間生活の近場で起こっている不均一な地下水流動現象の実態を捉えようとするものであった。その評価者の指摘は、「3つのケースはスケールが違うだけで移流や分散のメカニズムは共通しており、研究成果に科学的新規性はない。」という意味かと思った。しかし、科学的新規性もあれば実用性も高い成果であり、そもそも実用性の高さが求められる予算制度であることから、その様な指摘ではなかったようだ。不均一場を前提とした解析によって初めて水環境汚染の対策が可能になることを説明したが、受け入れられず、「精緻なスケールで解析することは無意味。」と言わんばかりで、指摘の本質が理解できないまま終わった。結局、他の2名からは高い評価が得られたが、発言した評価者による評価は低かった。その評価者が地球規模のスケールで地質を扱う海洋地質の専門家であることがわかったのは、後のことである。

自然科学は、自然に属する諸対象を取り扱い、その法則性を明らかにする学問である。そういう意味で、微細な不均一性を無視しうるスケールで地層の透水性を表現する法則を整理したダルシーの業績は偉大である。この普遍的な法則は、地層の透水性を調査するとき、根や小石の混入を避けて均質なマトリクス部分から試験コアを採取しようとしたり、実験結果の整理にあたって最大値や最小値を外して平均する手法を正当化した。確かに、降水が少ない時期の土中水の移動を解析する場合には、このようにして得られた透水性を用いて現象は正しく表現できる。しかしながら、降水が多い時期の不飽和帯の浸透現象や地下水面下の地下水流動現象では、マクロポア等連続する粗孔隙を通じた分散の小さい移流が主体になる。法則性を明らかにする科学とは別に、汚染物質の挙動を取り扱う現場では、その到達時期と濃度を推定できる技術が求められているのだ。

対象とする流動系の規模に応じて不均一場の扱いが異なる事例として、花崗岩でできた山体の地下水を考えてみよう。花崗岩体には割れ目があり、表層と割れ目近傍は風化によってマサ化している。強引に言ってしまうと、ルービック・キューブのような構造を想像してもらえばよい。地下水はこのような割れ目を満たし緩やかに移動する。単位キューブに比較して十分大きな山体を対象にすれば、山体は細かくヒビが入った均一な多孔質体に近似させることができる。そして、定常的な広域流動系は山体の垂直断面に描いた等ポテンシャル線と、それに直交し山腹から山体内部を経て

* (独)農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 〒305-8609 つくば市観音台 2-1-6

谷に向かう流線で表現することができる。

しかしながら、表層の地下水はそう簡単ではない。マサに浸入した水は斜面に沿って流下する。そのうち一つの割れ目系に入り、割れ目が谷川に露頭したところで湧出する。正しくは、露頭に直結する局所的流動系が地表近傍の浸透水を集める流れを形成しているということだ。このように、局所的流動系は割れ目の存在が支配要素となり、広域流動系から独立している。

山体の割れ目系に類似する不均一場として、平場には旧河道がある。河川近傍の農地の直下には旧河道が網の目のように潜在し、自然の地下排水路を形成している。古い地形図には農地の形状に旧河道の姿が残されているが、大区画に整備された今日の農地や盛り土された宅地の下に潜在する旧河道は、古地図に依らなければどこにあるかわからない。

山であれ平場であれ、局所的流動系では無視できない不均一場があるということである。

地下水流動によって形成される不均一場にも触れておこう。山腹からしみ出る水は、地質のわずかな不均一性に基づいて集束し、湧水となる。やがて流れは地中の細粒成分を湧出口から排出し、湧出口から地中に連続する粗孔隙系を形成する。孔に向かうフラックスが増大し、孔壁の崩落も加わって、孔空間が縦横に成長していく。このような現象は、崖に蛇口をつけたような地下水の大量湧出、地すべり地でのボラの形成、舗装道路の陥没、排水路等コンクリート構造物の裏込め流亡など、身近によく見受けられる。排出口さえあれば地下深部でも同じ現象が起こっており、揚水ポンプの出力を上げると一気に地中の砂を吐き出す排砂現象は、井戸屋の世界では常識である。

以上、農村の地下水を相手に調査研究をしていた時代を思い出しながら、不均一場の取り扱いに苦しんだ話を紹介した。それこそスケールの違う現象を強引に一まとめにしており、土壌物理学から、土質力学、応用地質学までをまたぐ世界である。

今年のノーベル賞は、自然科学系3分野で実用的な研究業績が対象となった。科学者には学術の進歩への貢献とともに、科学技術を以て社会問題の解決に貢献することが期待されている。土壌物理学には基礎科学としての確実な発展はもとより、社会に環境保全技術を提示する応用科学の側面も強化してもらいたいと、私は考えている。普遍的な法則の追究はもとより、不均一場の存在を前提にスケールの問題を乗り越え、極端な事象の出現も視野に入れた環境科学としての役割も担ってもらいたいと願っている。

そういう意味で、拙文が環境問題に関心のある会員に対してスケールの違う世界の技術的課題をイメージしてもらおう機会となれば幸いである。

ちなみに、私には日本地質学会が開催する地下水汚染対策の研修会で、行政部局やコンサルタント会社の技術者を対象に不均一場の地下水流動系の実態を語り続けた時期がある。地方自治体の議員であった受講生の一人は、受講した知識を基に地元で地下水調査を継続し、環境汚染リスクが大きな工場の立地計画を変更するなど、地域の一万世帯の水源を守る活動を展開した業績が認められ、朝日新聞社から「明日への環境賞」を授与されている。日本の各地で水環境問題は待ったなしの状態である。