浸透／地下水涵養に伴う水の動きと物質の動き －真の動きと見かけの動き－

田瀬 則雄^{*1}

Behaviors of water and substances through infiltration and groundwater recharge －direct and indirect phenomena－

Norio TASE^{*1}

Abstract

Since hydrological systems are basically seamless and continuous, the infiltrated water by rainfall, meltwater, or irrigation water through ground surface causes groundwater level to rise and/or alters their chemical properties simultaneously or with some delay. In these phenomena, the infiltrated water could not necessarily reach groundwater directly and there might be some indirect mechanisms to induce these changes. Understanding differences and relations between direct and indirect phenomena is very important. This paper introduces some examples on this matter and briefly discusses for future researches.

Key words: infiltration, groundwater recharge, direct phenomena, indirect phenomena

I. はじめに

降雨, 融雪, 灌漑などに伴い発生する浸透, そして地下水涵養は, 地表面から地中への水そして物質の移動・輸送の始点である。

水循環系は, 基本的にはシームレスで連続しているので, 降雨, 融雪, 灌漑などにより水が地表面を通過して浸透すると, 地下水面が瞬時に, あるいはある時間をおいて上昇したり, 地下水水質や水温が変化したりすることになる。これらの応答には, 実際に水が移動して直接的に変化をもたらすものもあるが, 他の要因を介して間接的に生起するものもある。これらの真の動きと見かけの動きを混同せず, 明確に分離し, 真の動きと見かけの動きをもたらす要因・プロセスを同時に理解しておくことが重要である。

たとえば, 降雨に伴い短時間で地下水位が上昇することが観測される。降雨が原因であるが, 観測点付近で浸透した水が必ずしも地下水面に達した結果ではない場合がある。また, 「富士山で雪解けが起こると, その70～80日後に三島の湧水量が増加するので, 富士山から三島までの年齢(滞留時間)は70～80日である」というように理解(誤解?)されたりしているが, 実際涵養された雪解け水は数十年かけて三島まで流下してくるものと考えられる(e.g. 馬原, 1993; Tosaki *et al.*, 2011)。これらの現象にも, 原因と結果を結びつける何らかの間接的なプロセスが存在している。

この辺の議論は, 樫根(1981)がすでに行ない, その後の研究で多くのことが明らかになってきているが, 滞留時間, 物質の輸送などで数々の

* 1 筑波大学 University of Tsukuba

トレーサーが利用（風早ほか，2007）されてきていることもあり，本稿では，真の動きと見かけの動きの関係，そこにどのようなプロセスや条件が関与しているのかを簡単にまとめてみた。

Ⅱ．トレーサーとインディケーター

トレーサー（tracer）は追跡子で，狭義には水文学では水の動きを追跡するものをさすが，広義では水とともに変動する物質の挙動を追跡するものもさす（田瀬，1993）。

インディケーター（indicator）は指標であり，水が動いた結果（あるいは直接的・間接的影響）を示すもので，たとえば，水位，水温，電気伝導度，水質などの観測値である。これらのインディケーターの変動を解析することで，水の動きを説明することができる。

トレーサー（とくに環境トレーサー）もインディケーターも水や物質の真の動きを示していない場合もある。たとえば，灌漑が始まり，地下水位が上昇し，さらに硝酸イオンの濃度が上昇することが起こる（大橋ほか，1994）。施肥による効果であるが，直前の施肥でなく，過去の施肥が周期性として土壤中に残留している，あるいは長年の施肥の結果，土壤中に飽和状態で蓄積しており，浸

透による水の真および見かけの動きに対応して，濃度も変化することがある。

また，水温は測定が容易なよく使われるインディケーターの一つである（佐倉，1993）。温度は地表との熱伝導による移動も加わるので，複雑になることもある（Taniguchi，1993）。

これらを考える際，浸透速度（応答速度）と地下水の移流速度の違いが関係してくる。すなわち，地表面近くの表層では，とくに不飽和帯で，鉛直方向の応答に水平方向の動きを凌駕するプロセスが存在しているためである。不飽和帯の水の動きは，飽和帯の水の動きに比べ，一般に1オーダー以上遅いと考えられるが，見かけの動きでは反対になることがあり，そこに何らかのプロセスが存在するのは興味深いものである。

本論では，トレーサーあるいはインディケーターは水とは表裏一体の関係にあり，真の動きと見かけの動きを区別したり，判別したり，そのメカニズムを説明するツールとして取り上げている。

Ⅲ．真の動きと見かけの動きの例

浸透／地下水涵養をコントロールする要因として，浸透量・速度（フラックス），不飽和帯の厚

Fig. 1 Conceptual diagram of infiltration and groundwater recharge processes.

さ（地下水面の位置）、土質、間隙特性（構成、率、大間隙）、水分量、透水係数、毛管水縁の高さなどが考えられる（Fig. 1）。この図ではほぼ平坦な二次元で描いてあるが、地表面や地中の不均一性、地形の凹凸と地下水面との関係なども加わり、複雑な応答が生起することになる。とくに、実際の現象では三次元的な挙動も重要である。

なお、マルチスクリーンやケーシングの不備などが大間隙の役割を担い、涵養速度や滞留時間の算定に支障をもたらすようなこともあるので、同様な注意が必要であろう。

1. 降雨に対する地下水位の応答

降雨に対する地下水位の応答に関する研究は、古くから降水と地下水涵養の量的関係を明らかにする観点から数多くなされてきた。

Fig. 2 は上総台地で観測された降雨に伴う地下水位の上昇と中性子水分計で測定した土壌水分の変化である（宮沢，1976）。降雨直後に、土壌水分の変化が直下の地下水面に及ぶ前に地下水位が上昇している。

不圧地下水の応答については、実際に浸透した降雨が降下浸透、とくに大間隙（マクロポア）を経由して地下水面に到達することも条件によって発生するが、封入空気形成や毛管水縁の正圧化と関連した押し出し流による地下水位の上昇も考えられる。ただし、現象としては、各種条件が複雑に関係していて、単純でないと思われる。

大間隙の役割では、樹幹流による根系域への集中浸透などもある。封入空気形成では、空気が封入される条件として大量の浸透、水田の湛水などが考えられるが、空気が封入されやすい条件は地形や地質構造にも依存している。また、毛管水縁の正圧化においては、ある程度の水平方向への伝搬が起こるのではないかと推測している。

一方、被圧地下水の降雨などへの応答は、一般に不圧地下水に比べて鈍いことが多いが、多くの場合、降雨（浸透）による加重に対応していると考えられる。

Fig. 2 Response of groundwater level and soil water to a rainfall event (Miyazawa, 1976).

2. 灌漑に伴う地下水位および水質の変化

水田あるいは畑地での灌漑にともない、水とともに施用された肥料などの物質が輸送されたり、変質したりすることにより、水位の変動とともに水質の変化が生じる。物質の移動・輸送が関係する場合は、やはり不飽和帯の厚さ、すなわち地下水面までの深さが重要になってくる。

水田と地下水位、透水性（沖積地、扇状地）などの条件によって、いろいろなパターンが出現するようである。前述の那須野原の例では、灌漑の開始とともに硝酸イオン濃度が上昇するが、地下水位が地表面から深いので、施肥の直接の影響でなく、蓄積された硝酸イオンが供給されていると考えられる（大橋ほか，1994）。Fig. 3 に示した琵琶湖湖岸の浅井戸では、同様の傾向に、途中の中干し期（7月中～下旬）と灌漑終了後に硝酸イオン濃度がピークを示している（鶴巻，1991）。田面と地下水面が近い場合には、灌漑停止（落

Fig. 3 Changes in nitrate concentration of a shallow groundwater at Matsuno-ura of western lakeshore of Lake Biwa (modified after Tsurumaki *et al.*, 1991).

水)により還元的な湛水状態から酸化的な状態に移行し、土壤に吸着していたアンモニウムイオンが酸化し、硝酸イオンとして溶脱してきた直接的な結果と考えられるが、いつ施肥されたものかは判別できない。

このような多雨期、灌漑期、施肥など入力である水と物質の周期性や季節変動が重なり、それらが地中に減衰しながらも残留し、地下水面へ到達している場合も見かけの応答をもたらす要因である。その際、受け手である地下水にも周期性や季

節性があり、相互作用として見かけの現象が現れることもある。

3. 融雪に伴う地下水温の変化

融雪に伴う現象は、灌漑の場合とほぼ同じと考えられるが、浸透する水の水温が0℃と低温であるところに特徴があり、融雪水のトレースに水温が利用される(谷口, 1985)。融雪水の河川からの伏没浸透のトレースなどにも利用されている(榎根・谷口, 1985)。

融雪に伴う地下水位の応答は、降雨や灌漑と基本的には同様と考えられるが、融雪期の開始とともに、気温の上昇による融雪に対応して地下水の水温が下向き矢印で示したように階段状に低下することがみられる(Fig. 4)。不飽和層が比較的薄く、融雪期開始前からの冷たい水の浸透により、ほぼ飽和状態になっている場合に、本格的な融雪により地中の冷たい水が押し出され、図中には示されていないが地下水位の上昇とともに水温が低下することになる。

4. 降雨－流出プロセス

1970年代の斜面水文学の発展の中で、降雨に伴う河川への流出成分の多くは、降雨前に既に地

Fig. 4 Changes in soil temperature, air temperature and snow depth at Nagaoka City (Taniguchi, 1985).

中に存在していた pre-event water であることが明らかにされた。すなわち、浸透した降雨により押し出された地中水が流出の主要成分となる。

この降雨－流出プロセスでは、降雨浸透、降下浸透、側方流などと上述の毛管水縁や封入空気、そして流域の地質構造などが加わり、Fig. 5 のような複雑な応答がみられることが報告されている (e.g. 丸井, 1991 ; 小野寺, 1991)。この図では礫層の上部にローム層が堆積している層状構造で、ローム層下部にも毛管帯が形成されているのが特徴で、降雨にともない、ローム層中をぬれ前線が降下し、やがて飽和帯が形成されることにより、礫層内の間隙空気が封入・加圧されることにより、降雨開始以前に斜面（礫層）に貯留していた地下水が押し出されることになり、降雨と地下水流出との応答関係がみられることになる。

Ⅳ. おわりに

以上述べた例のほかにも多くの現象があると考

えられる。真の動きと見かけの動きを明確に区別することは、生起している現象を正しく理解することであり、滞留時間、汚染の拡散などの評価では不可欠である。とくにモデルを適用する場合には、当然それらが反映されたものでなくてはならない。

近年、各種のトレーサーが利用でき、高度な解析が可能になっているが、これらを活かすためには、現象を正しく捉え、解析することが必要である。

また、対象とする現象を点、線、面、立体など異なった次元、一つ上の次元で見比べたり、鉛直的影響と水平的の影響を組み合わせ考察したりするなど視点を広げて取り組むことが必要かと思われる。

参考文献

大橋真人・田瀬則雄・檜山哲哉・鈴木裕一 (1994) :
那須野原における地下水中の硝酸イオン濃度の

Fig. 5 Roles of trapped air in the unsaturated zone during rainfall-runoff process (Marui, 1991).

- 時空間変動について. *ハイドロロジ* (日本水文科学会誌), **24**(4), 221-232.
- 小野寺真一 (1991): 多層構造を有する丘陵地斜面における地中水の挙動. *地理学評論*, Ser-A **64**(8), 549-568.
- 風早康平・安原正也・高橋 浩・森川徳敏・大和田道子・戸崎裕貴・浅井和由 (2007): 同位体・希ガストレーサーによる地下水研究の現状と新展開. *日本水文科学会誌*, **37**(4), 221-252.
- 榎根 勇 (1981): 土中水の不飽和流動 5. 地下水かん養と不飽和流. *土と基礎*, **29**(11), 67-75.
- 榎根 勇・谷口真人 (1985): 長岡平野の地下水-3. *水利科学*, **29**(3) (通号 164), 1-17.
- 谷口真人 (1985): 長岡市周辺における地中温度形成に及ぼす積雪および融雪浸透水の影響. *地理学評論*, Ser-A **58**(6), 370-384.
- 佐倉保夫 (1993): 温度をトレーサーとした地下水流動の研究. *ハイドロロジ* (日本水文科学会誌), **23**(2), 35-45.
- 田瀬則雄 (1993): 水文プロセスとトレーサー. *ハイドロロジ* (日本水文科学会誌), **23**(2), 83-89.
- 鶴巻道二 (1991): 地下水のノンポイント・ソース汚濁としての硝酸塩の高濃度化. *地下水問題研究会編「地下水汚染論」*. 共立出版, 56-63.
- 馬原保典 (1993): 三島溶岩流内地下水の年代について. *地下水学会誌*, **35**(3), 201-215.
- 丸井敦尚 (1991): 層状に堆積した斜面における降雨流出プロセスと地中水の貯留機能. *地理学評論*, Ser-A **64**(3), 145-166.
- 宮沢哲男 (1976): 豪雨直後の地下水位急上昇について. *愛知大学文学会文学論叢開学三十年記念特集号* (第 56・57 輯), 1-22.
- 安原正也・丸井敦尚・安池慎治・鈴木裕一 (1992): 大間隙を有する土壌中の降雨浸透水の挙動に関する実験的研究. *ハイドロロジ* (日本水文科学会誌), **22**(1), 3-15.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・嶋田 純 (2011): 火山灰土層中における土壌水の同位体比プロファイルと地下水涵養量の推定. *地球環境研究*, **13**, 43-57.
- Taniguchi, Makoto (1993): Evaluation of vertical groundwater fluxes and thermal properties of aquifers based on transient temperature-depth profiles. *Water Resources Research*, **29**(7), 2021-2026.
- Tosaki, Yuki, Norio Tase, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, and Yasuo Nagashima (2011): Estimation of Groundwater Residence Time Using the ^{36}Cl Bomb Pulse. *Ground Water*, **49**(6), 891-902.

(原稿受付: 2011年12月14日)

(原稿受理: 2012年 2 月20日)

この論文に対する「討論」を2012年11月30日まで受け付けます。

浸透／地下水涵養に伴う水の動きと物質の動き －真の動きと見かけの動き－

田瀬 則雄

要 旨

水循環系は、基本的にはシームレスで連続しているので、降雨、融雪、灌漑などにより水が地表面を通過して浸透すると、地下水面が瞬時に、あるいはある時間をおいて上昇したり、地下水水質や水温が変化したりすることになる。これらの応答は、実際に水が移動したことによる直接的变化である場合と、間接的に他の要因を介して生起するものがある。これらの真の動きと見かけの動きを混同せず、明確に分離し、それらをもたらす要因・プロセスを同時に理解しておくことが重要である。本論では、浸透、地下水涵養における水と物質の真の動きと見かけの動きについて、例を挙げながら考えてみる。

キーワード：浸透，地下水涵養，真の動き，見かけの動き