水循環を可視化しながら健全に育てる試み
ー湧水の郷、福井県大野市の例ー

福井県大野市役所　中野孝教、帰山寿章

1. 自然環境と人間社会の水循環をつなぐ湧水

湧水は地下水が地表に現れたものである。地下水と地表水は一つの水体としてつながっているので、水質も互いによく似ている。ところが、流速や流量、水温だけでなく、水利用の歴史や利用形態さらに水管理においても、両水には大きな違いが見られる。湧水の保全には、存在形態が異なるこれら二種類の水について、自然科学だけでなく人間社会的な側面においても研究を進め、水循環に対する人々の共通理解を深める必要があると言えるだろう。

地表水も地下水も、その起源は流域に降る雨や雪（降水）にあるが、温暖化や異常気象など、人間活動の影響は大気環境にも様々な時空間スケールで及ぶようになった。流域の水管理においても、大気も含めて水循環を構成する各種水のつながりの全体像を明らかにし、その変化をモニタリングする必要が出てきた。しかし、大気中の水蒸気の発生から降水に至るプロセスだけでなく、地下水の涵養域から地下での流動や流出についても良くわかっていない点が多い。地表を流れる河川水と異なり、地下の水も大気中の水蒸気も目に見えないからである。

人間は水が循環する性質を利用して、上水や下水あるいは用水や排水として生活や産業に取り入れてきた。湧水は河川のように氾濫したり濁ることもなく安定して水を確保できるので、その周辺には古来より集落が作られてきた。日本でも湧水周辺に縄文時代の遺跡が知られ、稲作が盛んになった弥生時代には井戸も作られている。古墳時代から飛鳥、奈良時代に入り、国の形が整備され都市が発展すると多くの水が必要になる。井戸が掘られ地下水が生活に利用されるようになるが、流速が遅い地下水は大量の水の獲得には適さない。上水道は16世紀中頃に小田原城下で早川の水を利用して築造されたのが最初といわれているが、新田開発が進み100万人を超える世界一の大都市になった江戸では、多摩川から取水した玉川上水も含め大量の河川水が利用された。江戸時代後期には井戸堀技術が進み、深層の被圧地下水も利用できるようになったが、井戸水は汚染されるとその影響が長期に及び、共同井戸では被害が拡大する。江戸時代末期から明治初期にかけてペストなどの伝染病が大流行し、多くの死者がでたこともあって、上下水道の整備が始まった。明治末から昭和にかけて、人口が集中する沿岸の大都市域で被圧地下水が工業用水などに大量に取水され、深刻な地盤沈下を引き起こした。工業用水法（1956年）やビル用水法（1961年）による揚水規制により地下水位は回復したが、地下施設の浮き上がりなどの新たな地下水障害が現れており、地盤沈下は現在も回復していない。その一方で上下水道施設の老朽化が進んでおり、施設の持続的な維持管理が大きな問題になっている。

地下水と地表水を廻る人間社会の歴史は、両水の利用や保全、管理には自然環境での水循環を明らかにするだけでなく、それらの知見を上下水や用排水といった人間社会内部の水循環にうまく取り込むことの重要性を教えている。水循環は地域的な特徴がたいへん大きい。降水の一部は蒸発散し水蒸気となって大気に戻るが、残りの水は土の中を浸透する。この過程で降水はろ過され、微生物の力を借りながら不純物は分解され、鉱物に含まれているミネラル成分を取り込みながら水質が変化し、土壌さらにその下の地層や岩塊の隙間などに集まり地下水となる。降水の量や質さらに土壌や微生物、岩石の種類（地質）の違いは、地下水さらに湧水を通して地表水に反映される。地表水と地下水をつなげる湧水には、流域の水循環の個性が現れている。土地利用など人間が流域を改変すればその影響を受けるので、失われた湧水も多い。健全な水循環の実現には、水循環を構成する各水と関係する要素のつながりを見えるようにする専門的な研究を実施すると共に、個々の研究全体を統合し、得られる成果を社会の中に同化して行かなければならない。こうした観点から、湧水の郷、福井県大野市で実践してきている事例について紹介する。

2. 福井県大野市の湧水研究と環境学習

福井県大野市は人口3万余りの小都市で、日本100名山の一つ荒島岳を中心に1000m級の山々に囲まれた大野盆地（約80km²）には、8000本もの井戸が分布する。市の中心は盆地の北西部（以下、市街地と呼ぶ）にあり、清水と呼ばれる湧水に恵まれ人口と井戸が集中している。盆地の標高は南部（250m）から北部（150m）に向かって低下しており、東から九頭竜川、真名川の2大河川、さらに清滝川、赤根川の小河川が南から北に向かって流れている（**図1**）。大野盆地には縄文時代早期の

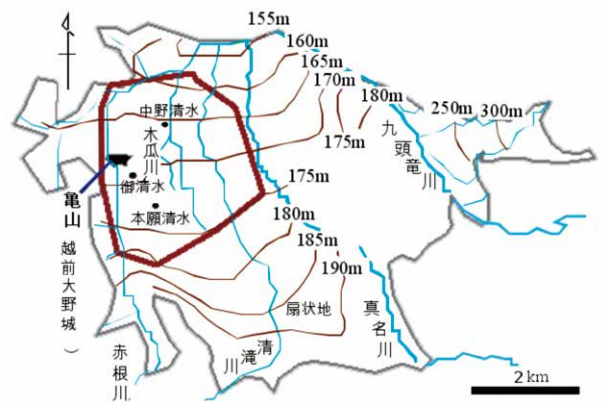

図 1. 大野盆地と市街地（太茶色線）、河川、代表的な湧水（清水）、地下水位線面の標高線（茶色）

遺跡があり、古くから河川沿いに集落があった。市北西部の亀山には越前大野城があり、周囲には湧水を利用した用排水路が縦横に整備され城下町として発展してきた。近年では、水道水が日本一おいしい市町村、また秋から冬にかけて盆地霧が発生し天空の城が見られる市としても知られる。

豊かで清澄な湧水（**図２**）を利用した機織りなどの産業が盛んであったが、1970 年～ 1980 年代に井戸枯れや地下水汚染が発生した。市では地下水位や湧水量を中心とする調査を実施し、地下水は盆地の南から北に向かって流れていることが明らかになった。しかし渇水期や消雪用の揚水量が多くなる冬季には地下水位が低下し、水位変動も地域差が大きい。市では湧水再生対策室を設け、40 年余りにわたり市内 32 地点で水位観測を実施しているが、市街地では機器ではなく市民が毎日手動で観測し、水への意識の持続や向上を図っている（**図３**）。湧水の恩恵を水に恵まれない地域に還元するため、水の恩返し事業を開始しており、市が一体となって湧水を活かした町の活性化が試みられている。水質についても、総合地球環境学研究所や各地の大学が参加した調査が行われている。学生教育の一環として、河川や湧水、農業用排水などの調査が実施される一方で、小学生も研究に参加し市内の井戸水の水温測定や採水を行っており、以下のような知見が得られている。

図 2. 大野市の代表的な湧水（清水）

図 3. 市民による日々の水位観測（上：本願清水、下：中野清水）

2- 1. 水質

さまざまな水質成分が分析されているが、図４は市街地域の井戸水の酸素同位体比の分布を示した地図である。同じ値（色）を示す井戸水が南北に見られるが、水質の類似性は地下水の起源が同じであること、言い換えれば一つの地下水脈を示している。水位観測からも、盆地の地下水は南部の扇状地から北部に流動していることがわかっているが、市街地の東西で異なる値を示す井戸水の存在は、地下水が東西方向に混合することなく北に向かって流れていることを示している。地下水保全には涵養域の特定が不可欠であるが、水質分析によって地下水流動を可視化でき、従来に比べて涵養域を詳細に特定できるようになった。

市街地の中心には、湧水を水源とする河川である木瓜川が流れているが、この市内河川の東部と西部では濃度が明瞭に異なる水質成分がある。その一つは硝酸イオンで、濃度が高い井戸水でも水質基準値の５分の１程度であるが、木瓜川西部の井戸水は濃度が高い（**図４**）。南部の扇状地の井戸水と比べても高濃度であることから、市街地での人間活動による可能性が非常に高い。大野市の上水道普及率は 20％程度に止まっており、全国平均（97.9％）に比べて非常に低い。市街地域では地下水を利用しているためであるが、下水道の普及率も、近年向上してきたとはいえ 45.4％（2018 年）であり、全国平均（78.3％）に比べて低い。硝酸イオンマップの結果は、市街地の井戸水は上位に不透水層がない不圧帯水層であり、その保全には市内の排水処理や土地利用などに最新の注意を払う

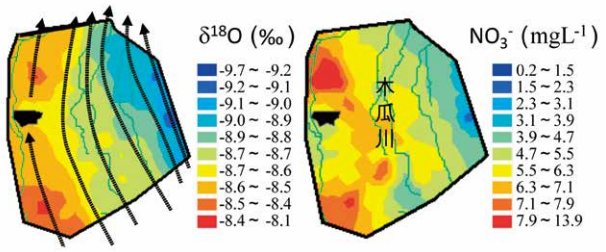

図4. 市街地の井戸水の酸素同位体比（左）と硝酸イオン濃度（右）のマップ．地下水脈の流動方向

必要があることを示している。

これに対して木瓜川東部の井戸水には、水質基準値をはるかに下回るものの、ヒ素やセレン、モリブデンといった重金属元素の濃度が高い傾向が見られる（**図５**）。水質結果により、これら井戸水の主な涵養域は稲作や畑作が盛んな真名川から清滝川の間の扇状地の東部であることが明らかになっている。この涵養域の農業用水は真名川から大量に取水されているが、扇状地西部では清滝川や赤根川からも取水されている。農業用水は排水された後に再び河川に放流されるが、多くは地下に浸透する。農業用水と田面水、農業排水の予察的検討によれば、多くの元素の濃度は、用水に比べて田面水で高く排水で低く、地下水はさらに低い。これらの結果は、土壌には多くの元素を吸着し水質浄化の機能があることを示しているが、扇状地東部の田面水や排水は、これら重金属元素の濃度が高い傾向が見られる（**図５**）。この結果は、農業で利用される肥料や殺虫剤などにこれら元素が含まれ、市街地の地下水に反映している可能性を示唆している。湧水や地下水の保全には土壌機能だけでなく肥料や農産物との関係を評価することも重要である。

生物や農産物には水質の地域的な特徴が反映されるので、それらの生息地や生産地の指標として利用でき、食品の産地偽証などへの応用研究も活発に行われている。扇状地で生産される里芋やソバは大野市の特産物である。市街地の湧水の再生や地下水の持続的利用には涵養域の保全が不可欠

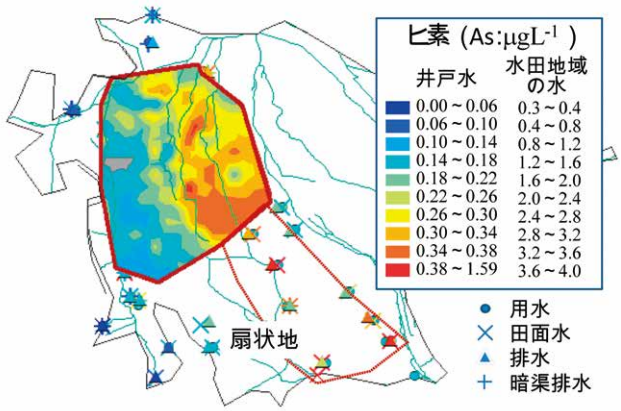

図5. 市街地の井戸水と水田の用水、田面水、排水、暗渠排水のヒ素濃度の関係

であるが、用排水や肥料・土壌に関する情報は農産物の振興とも無縁でなく、それらも含めた研究のつながりが望まれる。

２－２. 水温

市内の湧水の一つである本願清水は、淡水型イトヨの生息地として国の天然記念物に指定されている。イトヨは20℃以下の水温で生活できる冷水魚で、大野市が日本の生息地の南限であることから、水温や水温変化に関する知見は生息環境の保全にも有用な知見を与える。水温測定は環境教育の一環として小学生が参加し、0.1℃の精度があるデジタル式の水温計を用いて実施している。その結果、水温が季節によって変化するだけでなく、水温変化にも大きな地域差のあることがわかってきた（**図６**）。このような結果は、井戸水の水温が涵養域の水温ではなく気温、すなわち地温の影響を受けていることを示しており、井戸水が採水深度の浅い不圧地下水であることと良い一致を示す。地表からの温度変化の影響は、地下水の流動量が多ければ受けにくいと考えられるが、水温変化が小さい地域（北東部や南西部）は湧水量が多い地域にほぼ一致する。このように、小学生による水温測定であっても、湧水保全に重要な情報を提供することがわかってきた。

このような結果を受け、地下水位の主要な観測地点で、2015年度からロガーによる水温の連続観測を実施している。大野市の代表的な湧水である御清水での結果によれば、降雨に伴う変化などが明らかになってきており、地表から浸透する水の影響を受けていることや、同じ井戸でも深度による水温変化なども明らかになってきた。小学生による水温一斉測定と合わせることで、地下水の特徴がさらに明らかになると期待される。

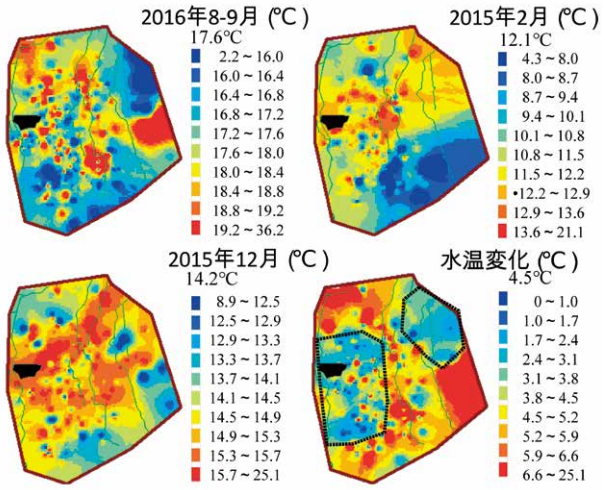

図6. 市街地の井戸水の水温の季節変化と水温変化のマップ．右下図の黒点線部分は湧水量が多い

２－３. 水位

市街地の井戸水の水位や水位変化の程度にも地域性がある。市街地の帯水層は不圧で地下水は北に向かって流れているので、市街地の南側は水位が高く北側は低い。扇状地からの涵養量が多い場合は、帯水層南北の地下水の水位差が大きく流速や流量も大きくなるが、涵養量が低下し帯水層内の水位差が小さくなると流速も流量も低下する。図３において、南部の本願寺清水の水位変化が北部の中野清水に比べて大きいのは、このような地下水流動による。市では南部の春日小学校を地下水位の基準点にしているが、春日小学校と他の地点の地下水位は互いに同調して変化している。しかしその関係を詳細に見ると、一本の直線上で水位変化する井戸と、二本の直線に分かれて変化する二種類の井戸に分かれる（**図７**）。

後者の井戸は、春日小学校の水位に対して、ある深さを境に異なる水位変化を示している。例えば、亀山の南にある御清水では、地下水面が 1m 以下になると、春日公園に対して水位がより大きく低下する。このような井戸は木瓜川の西側に多く、亀山は南からの地下水の流れに対してブロックする役割があることを示唆する。すなわち地下水量が多い時は、南部からの地下水の流れをブロックするので水位低下は小さいが、地下水量が少なくなると流速が遅くなり、水位低下が強くなると考えられる。亀山の北側の井戸と南側の井戸では異なる水質成分があり、帯水層の地質の違いを反映している可能性が高い。亀山周辺は湧水が豊富で大野市の中心として発展してきたが、その保全には地形・地質や人間活動も含め盆地の水循環を総合的に調べることが重要といえよう。

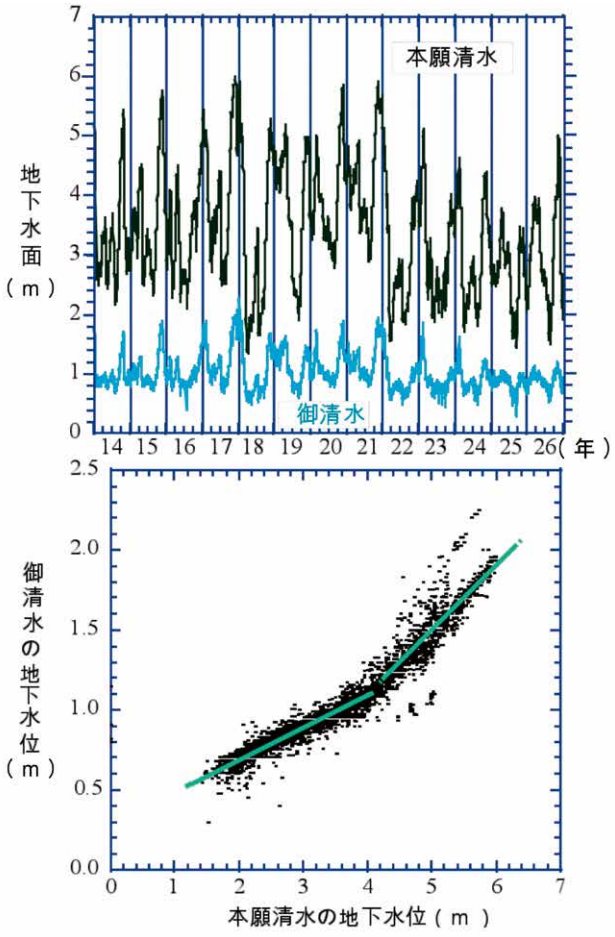

図７. 本源清水と御清水の地下水位面の時間変化（上）と両清水の水位（地表面からの深度）の関係（下）

３. 今後の課題

流域に存在する各種の水は、大気、生物、土壌、地質といった自然要素だけでなく、生活や農業などの各種産業とも深く関係している。こうした水循環に伴う自然と人間社会との様々な相互作用の中で、水の量や質は大きく変化しており、そのシンボル的な存在が湧水と言えるだろう。湧水保全には、相互作用に関する個別的な知見や活動が健全な水循環の実現につながるようにして行く必要がある。この報告は、筆者が総合地球環境学研究所在職時に行った大野市からの受託研究をまとめたものだが、各種の水質分析を出発点に、小学生による水温測定や市民による水位調査とも関係づけられるようになってきた。

環境研究では、観測や調査に基づく実証データが重要であるにもかかわらず、多くの大学において野外での研究や教育の実施は難しくなっている。大野市では地域創生の一環として、研究者や学生が同市で調査・研究することで新たな知的資源の獲得を目指しているが、外部の大学や研究機関においても大野市が野外研究教育の場として機能すれば、両者に相乗効果が生まれる。こうした観点から、これまでに得られた科学的知見がさらに生かされるように、昨年度からは多くの大学が参加する萌芽的な研究を試みている。

土壌は水質浄化機能だけでなく農産物の品質にも影響を与えることから、農業地域の水研究を開始しているが、観光業も農業と共に大野市にとって重要な産業である。日本では霧の発生が減少しているが、霧は降水現象の解明に重要であるにもかかわらず研究事例は非常に少なく、霧減少の原因もわからない点が多い。盆地霧が観光となっている大野市における霧研究は、水循環にも有益な知見をもたらすと期待できることから、今年度から降水の水質観測を開始しており、地下水においても、流動の過程における水質変化や、河川水との交流など新たな研究課題を設定している。いっぽう小学生の水温測定による学習効果の検証はなされていないが、環境学習として毎年行われるようになっており、今後は、研究と学校教育とのより密な連携も視野に入れた展開を試みて行きたい。