

地下水の水は何歳？

— 福島県沿岸域の調査からわかったこと —

藪 崎 志 穂
(総合地球環境学研究所)

1. 地下水の滞留時間とは

皆さんが立っている地面の下には沢山の水（地中水）が貯留されています。地中水はその物理的な性質により土壌水と地下水に区分され、簡単に言えば地下水面より下にある水が地下水と呼ばれています。この地下水の源に関して、扇状地のように地表面から水が浸透しやすい地形が広がる地域では河川水が地下に浸透して地下水を涵養¹⁾している場合もありますが、多くは空から降ってくる降水が源となり地下水をつくりあげています。地下水が涵養される地域（場所）のことを涵養域といい、日本のような山地が多い地形条件下では、地下水の涵養域の多くは山間部となります。よって、涵養域の近くの比較的浅い地下水は涵養されてからあまり時間が経過していないことが多いですが、涵養域から遠く離れかつ深い地下水ではかなり長い時間をかけて流れてきていることは想像に難くありません。この水の流れてきた時間は人間に例えれば年齢に相当しており、学術的には「滞留時間」と呼ばれています。滞留時間の定義は、降水や地表水が地下に浸透して帯水層（地下水面）に達したときを0（ゼロ）とし、地下水が地中を流動して、ある場所に到達するまでにかかった時間のこと、とされています。ただし、地表面から地下水面までの不飽和帯の厚さが特に厚い場合には、この分を考慮する必要があります。日本のような島弧では地下水の滞留時間は比較的短い場合が多く、民家の井戸などで利用されている浅井戸（浅層地下水）では数年～数十年オーダーの滞留時間を示す地下水が多いですが、一方で工場用水や水道水源などで利用されている 100 m を超え

るような深井戸（深層地下水）では数十年～数百年、場合によっては千年以上の滞留時間を示す場合があります。更に 1,000 m を超える非常に深い井戸では、数万年～数十万年の値を示すこともあります。

2. 滞留時間の推定方法

このように滞留時間はバリエーションに富んでいます。それではこうした滞留時間はどのようにして求められているのでしょうか？

水の滞留時間の推定には複数の方法がありますが、比較的古くから利用されている手段として放射性同位体を用いる方法が挙げられます。放射性同位体の原子核は一定の時間の経過に伴い放射壊変をして他の元素に変化しますが、この原子数が半分に減るのに要する時間を半減期といいます。例えば ^3H （トリチウム）では 12.32 年、 ^{14}C では 5,730 年、 ^{36}Cl では 301,000 年となっています。この性質を利用して、試料水の放射性同位体の濃度を測定し、過去の時系列データと比較することにより滞留時間を推定することができます。一般的に半減期の 10 倍程度の時間まで推定することができるとされていますので、 ^3H では数年～100 年程度、 ^{14}C では数千年～数万年程度、 ^{36}Cl では数十万年～百万年のオーダーの滞留時間の推定に利用されています。調べたい水を採取してそれぞれの放射性同位体の濃度を把握することにより滞留時間を推定することができるので便利な手法ですが、対象とする放射性同位体が人工的に環境中に排出された場合にはこの方法の適用が困難になることもあります。

その他に、1990 年代頃から CFCs や SF₆ を用いた滞留時間の推定が行われています。CFCs はクロロフルオロカーボン類 (chlorofluorocarbons) といい、CFC-11、CFC-12、CFC-113 などがあり、冷却剤や洗浄剤などの工業用として 1930 年代に人工的に生成された有機化合物で、化学的に極めて安定な性質を持っています。SF₆ は六フッ化硫黄 (sulfur hexafluoride) のことで、電気や電子機器などの絶縁ガスとして 1960 年代から利用されている気体です。CFCs や SF₆ を用いる方法では現在～100 年ほどの滞留時間を推定することができるため、日本で一般的に利用されている浅井戸や一部の深井戸の滞留時間を推定するのに適した方法といえます（詳細は「同位体環境学がえがく世界、第 3 章 地下水流動研究におけるマルチトレーサーの活用法」をご覧ください）。

3. 調査地域の概要

滞留時間は持続可能な地下水利用の検討や地下水流動を把握する際に重要な情報となります。ご存知のように、福島県沿岸域は 2011 年 3 月 11 日に発生した地震の影響により津波が発生し、広域で甚大な被害が生じました。また、地震に伴い福島第一原子力発電所 (FDNPP) の事故が生じ、環境中に多量の放射性物質が放出されたため、長期間にわたり立ち入りや居住、農業活動などが制限されました。2023 年 1 月時点において、大部分では規制が解除されましたが、未だ立ち入りが制限されている地域もあります。その一方で、沿岸域では道路の修繕、盛土や堤防の造成、海岸防災林や緑地公園などが整備され、住民が戻り生活を再開する地域も増えてきました。また、稲作などの農業活動も徐々に再開されており、地下水の利用も今後増えてくることが予想されます。こうしたことから、沿岸域の現在の地下水の水質の特徴や、津波被害の影響の有無、地下水流動の把握などが重要であると考えられます。また、内陸部に飛散した放射性物質が浸透水と共に地中を移動して地下水に取り込まれた場合、それらの影響が

沿岸域の地下水に現れる可能性があるのか、もしあればいつ頃なのか、などの判断や対策を行う場合にも滞留時間の情報は不可欠です。本研究では地下水流動把握の一環として、地下水や湧水の滞留時間の推定に取り組みました (Yabusaki and Asai, 2023)。

研究対象地域は福島県沿岸域の新地町、相馬市、南相馬市、浪江町、大熊町で、湧水 31 地点、地下水 13 地点、自噴井 13 地点の計 57 地点で調査を行いました。なお、自噴井とは地下水が自然に地表に湧き出す井戸のことで、扇状地の扇端部や火山山麓、盆地などに設置された比較的深い井戸で多くみられます。本研究地の自噴井の深度は 30～100 m です。また、これらの地点において、³H 測定用 (湧水 38 サンプル、地下水 14 サンプル、自噴井 19 サンプル) と、CFCs、SF₆ 測定用 (湧水 9 サンプル、地下水 1 サンプル、自噴井 11 サンプル) の試料採取を実施しました。なお、調査地点数よりも ³H 測定用の採取サンプル数が多くなっていますが、これは時期に伴う濃度変化の確認のため、数地点において複数回の試料採取を行ったためです。また、³H のサンプル数に対して CFCs と SF₆ のサンプル数は少なくなっていますが、CFCs と SF₆ は大気に触れないように試料水を専用の採水容器に採取する必要があるため、一部の調査地点では分析用の試料水を採取することができなかったことに因ります。

4. 滞留時間の分布

採取した水試料について、前処理を行った後、³H は液体シンチレーションカウンターで、CFCs と SF₆ はガスクロマトグラフで濃度を測定し、それぞれ必要な補正を行い、大気中の濃度曲線と比較検討して滞留時間を推定しました。

³H 濃度は、湧水や浅層地下水では相対的に高く、特に FDNPP に近い浪江町や大熊町では高い値を示し、原発事故による放射性物質の混入の影響が及んでいることがわかりました (図 1)。一方、自噴井では位置に関わらず ³H は自然のレベルの

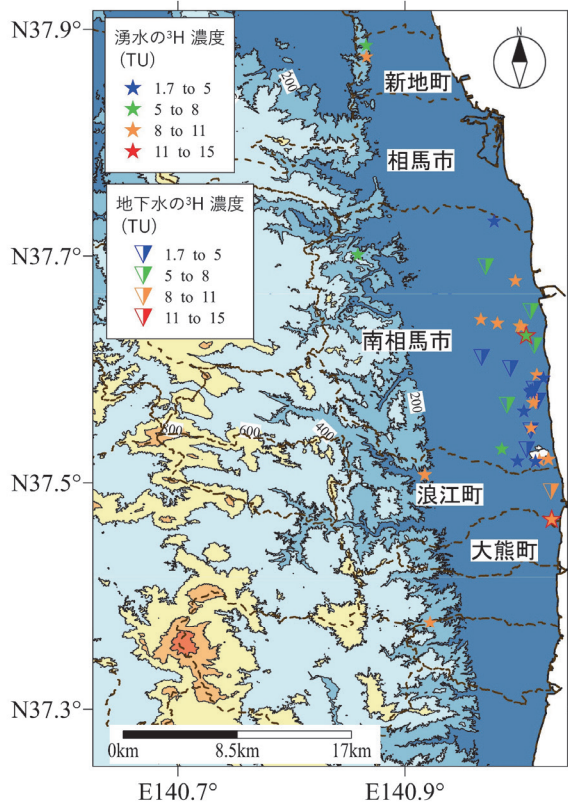


図 1. 湧水、地下水の ^3H 濃度分布図

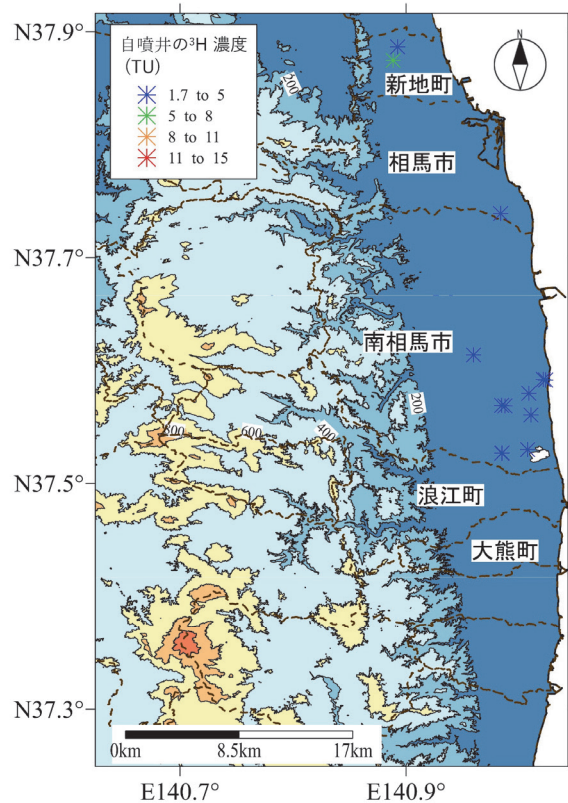


図 2. 自噴井の ^3H 濃度分布図

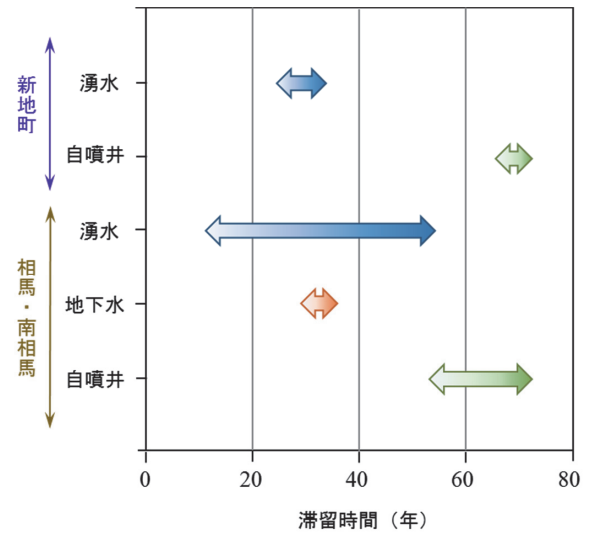


図 3. 滞留時間の推定値
(CFCs、 SF_6 を用いた解析結果)

範囲内（概ね $5 \text{ TU}^{2)}$ 以下）を示しており、FDNPP の影響は認められませんでした（図 2）。このことから、湧水や地下水では滞留時間を求めるために ^3H を利用することはできませんが、自噴井は ^3H の利用が可能であることがわかりました。

CFCs と SF_6 を用いた滞留時間の推定結果から、湧水と地下水の滞留時間は約 15 年～45 年、自噴井の滞留時間は約 50 年～70 年で、相対的に自噴井の滞留時間が長いことが示されました（図 3）。水質調査の結果をみると、自噴井の多くは NaHCO_3 型の水質組成を示し、また SiO_2 濃度が高いことから相対的に長い滞留時間の水質の特徴を有しており（藪崎, 2020）、本研究で求めた CFCs や SF_6 による滞留時間の推定結果と矛盾がありません。

5. 今後の課題

本調査の結果から、福島県沿岸域の地下水の滞留時間の推定値は、湧水と地下水、および自噴井では明瞭な差があり、地下水流動の違いを反映していることを把握できました。こうした滞留時間の結果を地下水流動の推定に活用して、沿岸域の適正な地下水利用につなげてゆきたいと考えています。また、阿武隈山地や宮城県沿岸域など他の

地域にも同様の手法を用いて、滞留時間の推定や地下水流動把握に努めてゆく予定です。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤（C）, 課題番号：16K01212, および 20K01150, 研究代表者：藪崎 志穂）の助成を受けて実施しています。

注釈

- 1) 降水や河川・湖沼などの地表水が地表面から浸透して地下水に吸収・付加されることを意味します。また、地下水の涵養が行われる地域（場所）を涵養域といいます。
- 2) TU とはトリチウムユニット（Tritium Unit）の略で、1 TU とは水素原子（H） 10^{18} 個中に ^3H が 1 個含まれていることを意味しています。従って、TU が大きければより多くの ^3H が含まれている（ ^3H 濃度が高い）ことになります。なお、1 TU は 0.118 Bq/L です。

文献

Yabusaki, S. and Asai, K. (2023): Estimation of groundwater and spring water residence times near the coast of Fukushima, Japan. Groundwater, (in press, Accepted on December 31st, 2022).

<https://doi.org/10.1111/gwat.13288>

藪崎志穂 (2020)：福島県北部沿岸域の地下水、湧水等の水質特性の把握と安定同位体を用いた涵養域の推定. 地下水学会誌, 62 (3), 449–471.

<https://doi.org/10.5917/jagh.62.449>

著者情報



藪崎志穂 筑波大学大学院 博士課程 生命環境科学研究科を修了。2016 年 4 月より総合地球環境学研究所に所属。専門は同位体水文学、地下水学。各地の降水の同位体長期観測や、地下水・湧水の水質の特徴把握、福島県や仙台市の沿岸域の地下水調査、忍野村の地下水流動観測などを行っています。

(2023 年 3 月 31 日掲載)