

トリチウムを用いた地下水と河川水の定量化による湧水モニタリング手法の開発

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～平 31

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：伊藤弘之、^{マクシム グシエフ} MAKSYM GUSYEV

【要旨】

日本における雨水中のトリチウム ^3H の濃度は、東京および千葉において 1961～2019 年の間観測されてきた。本研究では、千曲川上流域等の平均滞留時間 (MTT: Mean Transit Time) を推定するため、流域内の雨水、源流の湧水、河川水、井戸水を採用し ^3H 分析を実施するとともに、東京及び千葉の長期の雨水 ^3H 濃度の観測結果を活用した。その結果 70%指数モデルによる推定 MTT は、今回の調査地域では、9～31 年と推定された ($^3\text{H} = 1.890 (\pm 0.038) \sim 2.807 (\pm 0.052)$ TU)。一方、飲料水として使用されている長野市内の湧水では、 ^3H 濃度は $0.614 (\pm 0.024)$ TU、MTT は 160 年と長かった。深さ 1000m の鬘櫛温泉井戸では、MMT は 204 年であった ($^3\text{H} = 0.085 (\pm 0.014)$ TU)。

キーワード：トリチウム(^3H)分析、平均滞留時間 (MTT)、流域貯留量、水循環動態

1. はじめに

持続可能な水資源管理を行うためにも、地下水の移動や貯留の状況を把握することは重要である。

本研究は、トリチウム(^3H)同位体を用いて滞留時間を推定することにより、流域における水循環動態を解明することを目的としている。

天然の ^3H は、宇宙線(陽子)と大気中の窒素との相互作用により生成され、自然環境中ではほとんどの場合 ^3H 水 (^3HHO) として存在し、通常の水 (H_2O) とともに循環する。 ^3H の半減期は、12.32 年である。1950 年代から 60 年代にかけて、一連の水爆実験によって大量の人工 ^3H が大気圏内に注入され、北半球は人工 ^3H によって汚染された。そのため、図-1 に示す通り、東京等でも 1960 年代に雨水中の ^3H 濃度が高くなり、その後その濃度は徐々に減少し、現在ではほぼ天然のレベルまでに低下している。地下水中の ^3H は放射崩壊によって指数関数的に濃度が減少

する。水分子(^3HHO)の一部となった ^3H は化学反応の影響をうけないことから、降雨から地中を経由して川、湧水、井戸へ至るまでの滞留時間を推定できるユニークなトレーサである。同位元素、地表水、地下水の水文技術を結合することにより、地下水移動と貯留の状況を把握できる¹⁾。北半球の高緯度地域では ^3H の濃度が低く、これまでに本アプローチでの分析実績はわずかである²⁾。日本では、この目的のために、環境 ^3H トレーサを用いているが、ニュージーランドの GNS 科学トリチウム研究所の超低レベル ^3H 分析装置を利用することにより、低濃度地域での分析が可能となった。

2. 研究対象域と方法

2.1 サンプル収集サイト

本研究の対象流域を選定して、水文および利水、災害に関するデータを収集解析した。雨量、水位及びダム貯水量に関するデータは国土交通省の WIS データベースから、水理地質学的特性についてはウェブ上の日本の地質情報データを活用した。また、千曲川流域内にある流量観測所 2 か所、雨量観測所 15 か所のデータをもとに、2002～2019 年(塩名田については 2002～2006 年)の平水流量と年間降水量を計算した。各地の平水流量は、塩名田 $8.3 \pm 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ (流域面積 1179.0 km^2)、生田 $40.1 \pm 4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ (2036.4 km^2) であった。以上のデータを分析した後に、 ^3H 解析に必要なサンプル採取場所を選定、採取したデータの解析を行い地下水の移動を把握した。

河川、湧水、井戸及び雨からの試料水は、本州(千曲川流域、利根川流域、富士川流域)及び北海道・沙流川(さるがわ)流域等で採取した。本稿では、

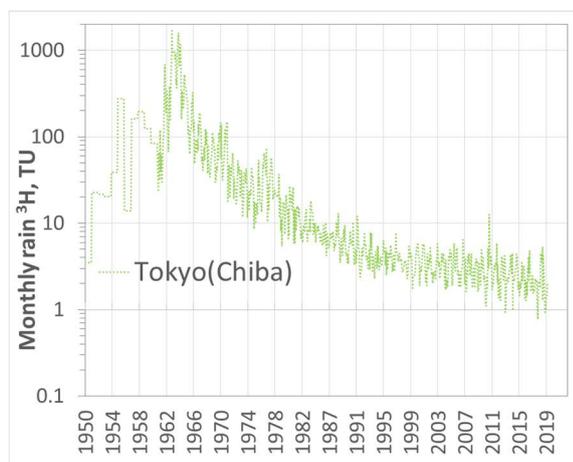


図-1 東京及び千葉で観測されたトリチウム濃度

本州に関して千曲川流域に絞って記述する。実施した採水は次の通りである。

- ・河川：20箇所（上田、野辺山、菅平等）
- ・浅井戸：7箇所（坂城町）
- ・深井戸：1箇所（坂城町）
- ・湧水：2箇所（長野市、千曲市）
- ・雨水：4箇所（長野、上田、野辺山、菅平）

2.2 トリチウム分析

北半球の高緯度地域では ^3H の濃度が低く、これまでに本アプローチでの分析実績はわずかである。今回、ニュージーランドのGNS科学トリチウム研究所の超低レベル・ ^3H 分析装置を利用することにより、低濃度地域の分析が可能となった。分析レベルについて注意すべきは、雨水については中レベルの解析で十分なものの、地下水や低流量時の河川水については極微量分析が必要だということである。33サンプルについては、液体シンチレーションカウンティング、電解濃縮の手法を用いて、 $\pm 0.014\text{ TU}$ の極微量 ^3H 分析をニュージーランドで実施した³⁾。残りのサンプルについては、弘前大学の赤田先生の協力を得て、 $> 0.12\text{ TU}$ とした中濃度の ^3H 分析を日本で実施した⁴⁾。また、水安定同位体および主要化学組成についても分析した。

2.3 トリチウム滞留時間と貯留量

河川水($^3\text{H}_{\text{riv}}[\text{TU}]$)、降水($^3\text{H}_{\text{rain}}[\text{TU}]$)、地下水($^3\text{H}_{\text{gw}}[\text{TU}]$)に含まれる ^3H の実測値を用いて、採水地の ^3H 物質収支を以下のように計算した。

$$^3\text{H}_{\text{riv}} \cdot Q_{\text{riv}} = ^3\text{H}_{\text{rain}} \cdot Q_{\text{rain}} + ^3\text{H}_{\text{gw}} \cdot Q_{\text{gw}} \quad (1)$$

ここで、 $Q_{\text{rain}}[\text{m}^3/\text{s}]$ および $Q_{\text{gw}}[\text{m}^3/\text{s}]$ は、それぞれ河川流量($Q_{\text{riv}}[\text{m}^3/\text{s}]$)を構成する降水流出量および地下水流量である($Q_{\text{riv}} = Q_{\text{rain}} + Q_{\text{gw}}$)。これを1)による河川流量分離法(河川流量を雨水と地下水に分離する方法)に用いて、式(1)を再構成して、比較的新しい降水のフラクション数(f_y)を推定するために以下の式を得た。

$$f_y = Q_{\text{rain}}/Q_{\text{riv}} = [^3\text{H}_{\text{riv}} - ^3\text{H}_{\text{gw}}] / [^3\text{H}_{\text{rain}} - ^3\text{H}_{\text{gw}}] \quad (2)$$

平均滞留時間は、重畳積分法(式(3))を用いて ^3H 濃度を計算し、 ^3H 濃度の実測値と比較することで推定できる。 ^3H 濃度 $^3\text{H}_{\text{riv}}$ は以下の式で求める。

$$^3\text{H}_{\text{out}}(t) = \int_{-\infty}^t ^3\text{H}_{\text{rain}}(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)} g(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

ここで、 $^3\text{H}_{\text{rain}}$ は雨水中の ^3H 濃度、 λ [1/年]は ^3H 減衰定数 0.05626 (^3H 半減期=12.32年)、 $g(t-\tau)$ は滞留時間分布であり、指数関数ピストンフローモデル(EPM)を利用すると、次のように表される。

$$g(t-\tau) = 0 \quad t < MTT(1-n^{-1}) \quad (4a)$$

$$g(t-\tau) = \frac{n}{MTT} e^{\left[-\frac{n(t-\tau)}{MTT} + n - 1\right]} \quad t \geq MTT(1-n^{-1}) \quad (4b)$$

ここでは、 MTT [年]は平均滞留時間、 n は全体量の指数関数量に対する比であり($n = \text{EPM ratio} + 1$ 、ここで $\text{EPM ratio} = \text{ピストン/指数}$)、完全な指数関数的フロー($n=1$)からピストン流れ($n>5$)に近い数値まで幅が

ある。式(3)では、図-1の月次の東京・千葉雨水の ^3H 濃度に対して、2)に基きスケーリングを実施した。すなわち、長期の東京・千葉の雨水の雨量及び ^3H 濃度データを基に、対象地域の短期の雨水の雨量と ^3H 濃度の測定値を使って補正して、対象地域の雨水の ^3H 濃度を推定した。

^3H 採取地点の流域貯留量($V[10^6\text{m}^3]$)は、平均滞留時間(MTT)及び流量(Q_{riv})から得られる。

$$V = Q_{\text{riv}} \cdot MTT \quad (5)$$

3. 結果

式(3)と $\text{EPM} = 0.42$ (70%指数モデル)から、千曲川流域で河川水のMTTは18~34年であった。2017年12月~2018年1月の調査から、 ^3H は $1.890 (\pm 0.038) \text{ TU}$ ~ $2.807 (\pm 0.052) \text{ TU}$ であり、MTTは9~31年であった。

坂城町の浅井戸7箇所では、 ^3H 濃度 $2.314 (\pm 0.043) \sim 2.681 (\pm 0.048) \text{ TU}$ 、MTT 26-37年であり、深井戸については、 ^3H 濃度 $0.085 (\pm 0.014) \text{ TU}$ 、MTT 204年という結果であった。山間部の湧水では、 ^3H 濃度は $2.765 (\pm 0.052) \text{ TU}$ 、MTTは25年であった。一方、長野市内の湧水では、 ^3H 濃度は $0.614 (\pm 0.024) \text{ TU}$ 、MTTは160年と長かった。

MTT (9~31年)と河川流量($0.0013 \sim 32.7 \text{ m}^3/\text{s}$)とを乗じると、図-2に示す千曲川流域の上流域($30.2 \sim 2036.4 \text{ km}^2$)地下水貯水量は、 $0.0011 \sim 19.61 \text{ km}^3$ の範囲となった。

4. まとめ

本研究では、千葉雨水の長期 ^3H 濃度データと対象地域の短期データを用いて、調査対象域での水の滞留時間・量を推定した。ニュージーランドのGNS科学トリチウム研究所の超低レベル・ ^3H 分析装置を利用することにより、平均滞留時間が長い湧水、井戸等の低濃度の ^3H 分析が可能となった。本研究結果は、日本及びアジア域の河川流域で滞留時間の長短を考慮した適切な水資源管理を実践するのに、 ^3H トレーサが有効であることを示している。

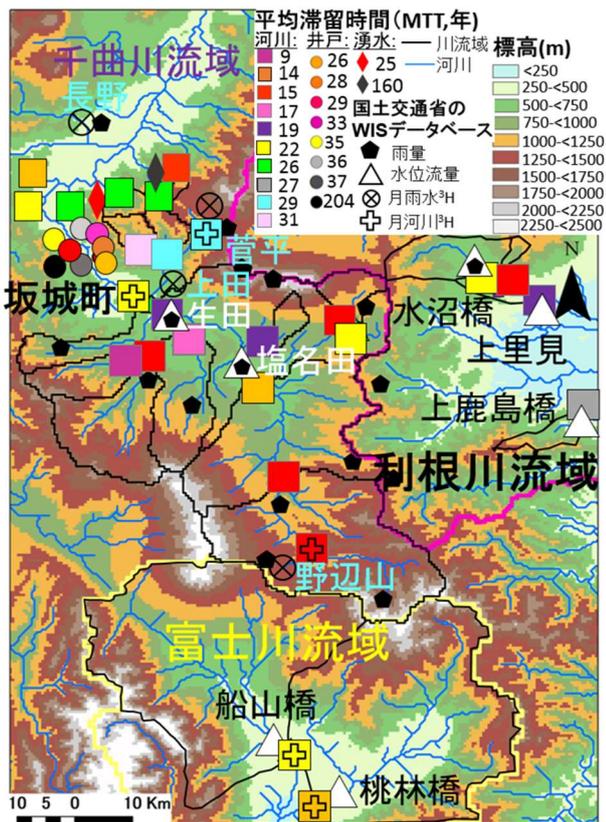


図-2 平均滞留時間 (MTT) 推定結果

参考文献

- 1) Gusyev M.A., et al.: Application of tritium in precipitation and baseflow in Japan: a case study of groundwater transit times and storage in Hokkaido watersheds. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20: pp.1-16, 2016.
- 2) Gusyev M.A., et al.: Evaluating anthropogenic and environmental tritium effects using precipitation and Hokkaido snowpack at selected coastal locations in Asia. *Sci. of the Total Environ.* 659: pp.1307-1321, 2019.
- 3) Morgenstern, U., Taylor, C.B.: Ultra low-level tritium measurement using electrolytic enrichment and LSC. *Isotopes in Environ. and Health Studies*, 45: pp.96-117, 2009.
- 4) Akata N., et al.: Tritium, hydrogen and oxygen isotope in monthly precipitation samples collected at Toki, Japan. *Radiation Protection Dosimetry* 184(3-4): pp.348-341, 2019.