

同位体水文学に関する研究

Review on the Studies of Isotope Hydrology

嶋田 純*

Jun SHIMADA

I はじめに

同位体水文学 (isotope hydrology) は、その名の通り、水文学の研究に同位体手法を応用するという学問分野であり、1950~60年代の同位体測定技術の向上に伴って拡大してきた応用技術として位置付けられている。

同位体水文学は、環境同位体水文学 (environmental isotope hydrology) と人工同位体水文学 (artificial isotope hydrology) に大別され、前者は、自然の過程で水の中に生じる同位体濃度の変化を利用するもので、自然界における同位体濃度の変化に関する情報を基礎として、広域的な水文循環の解明を目指している。これに対し後者は、調査対象となる水体に人為的に注入した同位体の濃度の経時変化を追跡することによって、その場の水体の流動状況を把握しようとするものである。

筑波大学地球科学系水文学研究室では、東京教育大学からの流れとして、この環境同位体水文学の中でも、環境トリチウムを用いた研究が精力的に行われてきており、それに加えて最近数年間は、安定同位体を利用した研究もおこなわれるようになってきている。本報では、筑波大におけるこの種の研究の流れを概観すると共に、あわせて今後の研究のあり方を展望する。

II 環境トリチウム

1 トリチウム濃度の測定法と降水中のトリチウム濃度変化

環境中のトリチウムは、大気中において核実験が盛んに行われた1955~1965年の10年間を除けば、一般には低濃度であるため、その濃度測定には採水した試水を電気分解法、あるいは熱拡散法等によって10~30倍程度に濃縮する必要がある。筑波大学地球科学系水文学研究室においては電気分解による濃縮法がとられており、嶋田 (1977) はここで使用されている大型・小型の2タイプの電解濃縮用セルの濃縮係数 β を重水濃度によって求めた。それらの平均値は、その後のトリチウム濃縮時の濃縮比の算定に用いられてきている。このようにして濃縮された試水は、低レベル測定専用の低バックグラウンド液体シンチレーションカウンター (Packard 社製2000CA型) を用いてトリチウムの放射能強度の測定が行われる。

トリチウムを利用した水文循環に関する研究において必須とされる入力としての降水中のトリチウム濃度については、東京あるいは筑波において1972年以来毎月定期的に採水分析されており、その一部は嶋田 (1978) および樫根ほか (1979) に公表されている。また、降水中のトリチウム濃度の地域的差異については、太平洋側の茨城県つくば市と日本海側の新潟県長岡市との比較を高瀬 (1978) が、また、降水の起源となる気団とトリチウム濃度の対比は、前述の嶋田 (1978) に述べられている。一般的には、冬季の大陸性気団性降雨が夏~秋季の海洋性気団性降雨に比べて相対的に高いトリチウム濃度をもつため、トリチウム濃度に季節変化が現れているが、濃度の地域的差異は季節変化程著しくなく、関東甲信

*筑波大学地球科学系・水理実験センター

越周辺におけるトリチウムを用いた水文循環の研究には、東京あるいは筑波の降水中のトリチウムデータを当該研究地域の降水の代用値として用いても、それ程著しい誤差はないとされている。

2 土壌水中のトリチウム濃度

環境中のトリチウムは、過去において降水中の濃度が人工的な核実験の影響により大きく変動したため、その濃度変化を追跡することにより、各種の水体の滞留時間や流動機構の解明に用いることができる。土壌中の水の流れは、地表付近の一部を除き地下水表面までの不飽和帯においては、基本的には鉛直下方への一次元流れであるため、一度浸透した降水は重力の作用で地下水表面に向かって降下してゆく。

降水から地下水への涵養機構は水文循環の中でも特に興味を持たれている分野であり、環境トリチウムを利用した地下水涵養機構の研究は主に年降水量700mm程度の半乾燥地において1970年代に盛んに行われた。これを受けてわが国のような温暖湿潤な気候下での地下水涵養機構の研究が、高水分量の火山灰性土壌である関東ローム層において実施された。榎根ほか(1980)は、東京都清瀬市の厚さ約6mの武蔵野台地を覆う関東ローム層中における土壌水を50cm毎に採取し、その中の土壌水を抽出してそのトリチウム濃度を測定した。1976年10月と1978年4月の2回にわたって同一地点の測定を行いその結果を基に、土壌水の水収支、トリチウム収支、並びにピストン流モデルに基づくトリチウムプロファイルを計算した。その結果、この地点における地下水涵養量は年平均885mm、日量で2.4mmに達し、わが国の平均地下水涵養量1mm/dayに比較するとかなり大きく、火山灰性土壌に覆われた台地の水収支特性をよく表し多ものであると評価された。

嶋田(1983)は、さらに厚いローム層を対象として神奈川県の間相原台地において深度20.5mまでの土壌を採取しpF3.0以下の自由水とpF3.0以上の結合水に分けて土壌水を抽出し、それぞれのトリチウム濃度を測定した。また、平田(1971)によって指摘された関東ローム層の大間隙中を降下浸透する水の地下水涵養に対する貢献の割合を評価するために、

ローム層の崖に掘られた洞穴を利用して地上から降下浸透してくる土壌水を直接採取しそのトリチウム濃度を継続的に測定した。その結果、同一深度においては自由水が結合水に比べて最近の降水の影響をより強く受けており、相対的には動き易い水であることが示された。また大雨直後に洞穴に漏出してくる土壌水のトリチウム濃度は洞穴周辺の土壌水中のそれよりも低く、最近の降水の影響を受けていること、また、漏出量が多くなるとトリチウム濃度が低くなる傾向があること等から、水みちの大間隙を伝わって地表から地下水表面まで連続して流れる水が存在することが確かめられた。しかし、洞穴に漏出してくる水のトリチウム濃度の一般的傾向は、前述したように周辺の土壌水のそれよりも若干低いものの、採水時点における降水中のトリチウム濃度よりはるかに高く、むしろ周辺の土壌水中それに近いことから、この大間隙を伝わる流れの存在が地下水涵養に関わる土壌水の降下浸透全体に与える影響はそれほど顕著ではないと結論づけている。その結果、土壌水のトリチウム濃度プロファイルは水の分子拡散程度の弱い分散を伴う置き換え流モデルで近似することが可能であり、研究地域の地下水涵養量は913mm/yと求められた。これは日量に換算すると2.5mm/dとなり前述の清瀬市における武蔵野台地の関東ローム層に対する値にほぼ等しく、これらの研究により火山灰性土壌に覆われた洪積台地の土壌水の降下浸透機構と年平均涵養量がほぼ確定された。

3 地下水中のトリチウム濃度

地下水中のトリチウム濃度の測定は、前述の土壌水よりはるかに以前から実施されており、そもそも環境トリチウム濃度の測定結果を水体の滞留時間の推定に利用され出したのは、地下水の年齢測定を機にしているといっても過言ではない。

筑波大学における最初の地下水のトリチウム濃度測定は、佐藤ほか(1979)による水理実験センターに掘削された300mの深層地下水観測井のサンプルである。筑波台地の深度220m付近から採取された地下水のトリチウム濃度は1.6 T.U.で、核実験開始前の降水中のトリチウム濃度を10 T.U.と仮定すると約30

年前に涵養された地下水であると解釈されている。砂丘地域における地下水流動については、杉沢(1979)が茨城県波崎地域において地下水調査を行っており、その中で涵養域にあたる丘陵の上部砂層ではトリチウム濃度が採水時の降水の濃度に近いのに対し、流出域の利根川河岸に近いシルト層下の地下水は滞留時間5年以上を経過した地下水であることが示されており、小規模な砂丘帯水層中の地下水流れの実態がとらえられている。鈴木ほか(1981)は、会津盆地北部の自噴井(30mおよび54m)の地下水中のトリチウム濃度を測定した結果、滞留時間10年以上で扇状地帯水層としてはかなり緩やかに循環する地下水の存在を確認している。その後近藤ほか(1983)は、同一自噴井のトリチウム濃度の継続測定結果を基に、畳み込み積分による時系列解析を行い、自噴井地下水の滞留時間のより詳細な検討をしている。また、榎根・李(1983)は筑波台地の120mまでの地下水および地表水のトリチウム濃度の測定を行い、トリチウム濃度の鉛直分布を土壌水の降下浸透による涵養と揚水に起因する地下水の鉛直方向の流動と関連づけて考察した。筑波台地では、深度5mまでの関東ローム層中の地下水は2~3年古くても5年程度でローム土壌を伝わる降下浸透速度と一致するものであり、それよりやや深い深度10mの井戸では滞留時間は7~10年程度と見込まれいづれにしても20m以浅の地下水は活発に循環しているのに対し、36m以深の地下水はトリチウム濃度も殆ど0 T.U.であり、その滞留時間は50年以上と推定され循環は不活発であると結論付けている。

近藤(1985)、Kondoh(1985)は、それまでのトリチウム濃度の時系列解析から地下水の滞留時間を推定する方法に代えて、特定地域のトリチウム濃度分布を把握することにより地下水流動の推定を試みた。千葉県市原市の養老川流域にある涵養域にあたる標高100m程度の台地部から流出域にあたる東京湾沿岸部を含む調査地域において、78カ所の井戸及び湧水の採水を行いそのトリチウム濃度を測定した。測定結果を基に1.5km幅の範囲の養老川を含む鉛直断面のトリチウム濃度分布を作成し、濃度の高低分布をもとに涵養域から流出域にいたる地下水の流動

特性の把握を行った。その結果、地下水の涵養域は台地部にあり、相対的に低い養老川低地や東京湾沿岸低地が流出域になっていて、その流動は地域の主要帯水層として確認されている単斜構造性の下総層群の砂泥互層のパターンに制約されることなく、むしろ地形の影響を強く受けたものになっていることが明らかにされた。1952年以降に台地部で涵養された高トリチウム濃度の地下水は30年以上経てもまだ養老川に達していないことから、その流動速度はせいぜい100m/y未滿、滞留時間は30年以上であると推定している。

表・榎根(1987)茨城県霞ヶ浦に面する洪積台地である出島台地において、台地を刻む谷の持つ排水機能と台地に隣接する湖水と地下水の交流関係を解明するために、調査地域内32カ所の井戸および湧水を採取し、そのトリチウム濃度を測定した。地表から土壌層を通過して涵養されるプロセスを考慮し、降水の実浸透量を踏まえた畳み込み積分により、地下水システムのトリチウム濃度の出力曲線を計算した。モデルによる出力曲線と実測値とを対比することにより、滞留時間40年以上、10年前後、9年未滿の3つのグループに識別し、その空間分布に基づいて標高-10~-20mを境として地下水は異なる流動を呈しており、境界の上部では滞留時間約10年、それ以深では40年以上であることを示した。また、地下水は全体としては台地部で涵養され解析谷に向かって流れており、これらの谷の持つ排水機能は大きいのに対し、地下水と湖水との交流関係は余り顕著でないことを明らかにしている。同種の研究で、透水性の大きい帯水層を対象にした例としては、本田(1991)の研究がある。調査対象は富山県黒部川扇状地の砂礫性の扇状地帯水層で、1990年5月に黒部川及び小川の2本の河川水を含む32本の扇状地地下水の採水を実施し、そのトリチウム濃度の測定を行った結果、指数関数モデルによる解析結果と対比して平均滞留時間2年から11年の浅層地下水と12年から47年の深層地下水という、異なった流動特性を持つ2系統の地下水が調査地域に存在していることを明らかにしている。

4 河川水中のトリチウム濃度

降雨流出時のハイドログラフにおいて、環境同位体を用いて直接流出成分と地下水流出成分を分離する研究は、Dinçer et al (1970) や Frits et al (1976) などによって実施され、地下水流出成分の占める割合がそれまで考えられていたよりもはるかに大きいことが分かってきた。田中ほか (1980) は、筑波研究学園都市の開発の影響を受けている蓮沼川と、自然状態の流域環境を維持している西谷田川において、電気伝導度及びトリチウム濃度を用いて降雨流出時のハイドログラフの分離を行ない、2つの河川の流域特性の比較を試みた。その結果、二つの流域とも降雨流出時の地下水流出成分が大きな役割を果たしていることが把握され、特に都市化が進行している蓮沼川流域では、ハイドログラフの減衰時にも直接流出成分が地下水流出成分を上回っており、流域内における都市化の進行が流出形態に影響を与えているものと判断された。また、ハイドログラフの分離法として、トリチウムを用いた場合と電気伝導度を用いた場合とでは、その分離結果に違いが認められ、電気伝導度を用いた場合には、雨水と土粒子との接触等による濃度の変化を考慮する必要があることを指摘している。

渇水期の河川流量は、主として地下水によって維持されており、この渇水期の河川水のトリチウム濃度は、流域内地下水の平均滞留時間を代表するものと考えられる。近藤 (1985) は千葉県市原市北部の台地を解析する養老川流域の18の小河川において、渇水期の流量とそのトリチウム濃度を測定し、流域の比流量、流域内地下水の平均滞留時間と地形条件の関係について検討している。対象流域においては、トリチウム濃度からは平均滞留時間は10から20年と推定され、30年以上の滞留時間を持つ地下水の存在は認められなかった。しかし、各流域毎の渇水比流量は大きく変動しており、著者はこの違いを地下水の集水面積に起因するものと推定している。三條 (1987) は、関東地方周辺的人工的な構造物・施設等の影響の少ない小流域40カ所において、1985年2月から3月の渇水期に河川水を採取し、そのトリチウム濃度を測定することにより、流域構造の違いの把

握を試みた。その結果、流出水のトリチウム濃度は、全体的には採水時点の降水中の濃度より高い傾向にあり、関東におけ小流域の平均的な滞留時間は、完全混合モデルによれば約5年と求められた。その中で、火山岩地域と非火山岩地域に2分してみると、火山岩地域では他に比べてトリチウム濃度が極端に高い値や低い値をとる傾向があり、いずれも非火山岩地域に比べて相対的に滞留時間の長い地下水循環様式であることが推定された。

三條(1991)は、筑波山北麓の男女川流域において異なる高度における降水、河川水の定期的採水を行い、そのトリチウム濃度を測定した結果、標高700m付近の河川水は渇水期において7 T.U.前後であるのに対し、高度の低下とともにトリチウム濃度が増大し、標高100mの山麓部では16 T.U.にまで変化していることを見だし、この濃度変化は、山腹斜面を覆う土層中の地下水の滞留時間では説明が難しく、山体を流動する大規模な地下水流の存在によるものであることを指摘した。完全混合モデルによる解析によると、山麓付近の地下水の平均滞留時間は約15年程度と見込まれた。また、豊水期に見られる山麓部河川水の相対的なトリチウム濃度の低下は、降雨にともなって発達した表層付近の浅層地下水としての低トリチウム濃度降水の涵養によるものと解釈され、地下水の流動状況が季節によって大きく異なることを指摘している。

5 湖沼水のトリチウム濃度

湖沼水の混合状態や、滞留時間の推定を行うことを目的に環境トレーサーとしてトリチウムを利用する研究があり、筑波大学水文学研究室においてはこの種の湖沼水文の研究は、佐藤芳徳が精力的に行っている。ここでは佐藤の行った一連の研究を概観してみる。

汽水湖における水の滞留状況は、塩水系の深層域と淡水系の浅層域とはかなり異なっている。佐藤・榎根(1982)は、福井県三方五湖において流入河川であるはず川、海水を含む湖水10サンプルについてトリチウム濃度の測定を行った結果、淡水の流入源であるはず川が23.4 T.U.と最も高く、一方の海水は

4.9 T.U.と最も低くなっており、5つの湖は基本的には流下方向に沿ってトリチウム濃度が低下する傾向が示されていた。これは高トリチウム濃度の流入淡水が、低濃度の海水によって徐々に希釈されているものと考えられるが、汽水湖である水月湖の深層水は塩水系であるにも関わらず、そのトリチウム濃度は上層の水より相対的に高く、停滞水をもった部分循環湖の特徴がうかがわれた。

循環性の温帯湖における研究としては、中緯度の深度の大きな温帯湖の典型として栃木県中禅寺湖を選定し、環境トリチウムを用いて湖水の混合及び集水域内の地下水の平均滞留時間の推定を試みている(佐藤, 1983)。1978年8月に測定した湖内4地点の湖水のトリチウム濃度の鉛直分布はほぼ等しく完全混合していると思なせたため、降水のトリチウム濃度の経時変化を入力として完全混合モデルにより湖水の平均トリチウム濃度を計算した結果、湖の水収支から平均滞留時間は約5.9年、集水域内の地下水の平均滞留時間は4年以内であると推定された。

佐藤ほか(1984)、Satoh(1986)は、年間を通じて表層水温が4度以下にならない熱帯湖の垂直混合機構を検討するため、鹿児島県池田湖において1973年、1974年、1979年の3回にわたり湖水の深度別採水を行い、トリチウム濃度の測定を行った。その結果、1973年、1974年の濃度分布には大気中の熱核爆発実験の影響をうけた高濃度の古い水が残存しているのに対し、1979年の濃度分布には、この高濃度水は消失していた。この消失原因を湖底からの漏出に求めることは水収支的にみて不可能であり、むしろ1976年から1977年にかけての例年に比べて特に気温の低下した冬の湖水温低下時に湖底までの全層混合が発生したものと考え、熱帯湖における深層水の半停滞性の存在を指摘している。

III 安定同位体

降水中の水素・酸素の安定同位体比は、同位体分別効果のために降水が形成されたときの温度の影響を大きく受けることが知られている。そのため降水中の安定同位体比は、季節変動、緯度による変動、高度による変動が見られ、これらの変動特性は水文

循環の実態把握に有効に利用できる。

嶋田(1989)は、筑波山麓の花崗岩中に掘削されたボーリング孔および岩手県釜石鉱山の花崗岩領域に展開された坑道内に掘削されたボーリング孔から採取された地下水の安定同位体比を測定した結果、いずれも採水深度の増大にともなって同位体比が軽くなる傾向が認められ、地下水のポテンシャル測定結果等と対比すると深部地下水ほど標高の高い所から涵養されていることを指摘した。これは安定同位体比の高度効果が、地下水の3次元的な流動状態の把握に有効であることを示している。

Sanjo(1991)は、前述した筑波山北麓斜面に展開する男女川流域において、標高別に降水と河川水、土壌水を1987年から1988年にかけて約1年半にわたり定期的に採取しその安定同位体比を測定した。降水中の安定同位体比には、その供給源となる気団の発生源に応じた著しい季節変動があるものの、いずれの採水時にも安定同位体比の高度効果が認められ、測定全期間にわたり降水量による加重平均をすると重水素で $-5\text{‰}/735\text{m}$ 、重酸素で $-1.0\text{‰}/735\text{m}$ となっている。一方、河川水中の安定同位体比は、降水のそれに比べると季節変動は著しく縮小されるが、その高度に対する変化傾向は加重平均した降水の高度に対する変化傾向と同様にして、高度が増大するにつれて軽くなる傾向がある。しかし、その変化は降水のそれとは完全には一致せず、河川水の安定同位体比の高度効果の方が相対的にはやや小さい。著者は、その原因を流域内での降水の同位体濃縮効果に求めて説明し、その実態を把握するために、流域内の森林部における林内雨と林外雨の同位体比を比較した結果、森林の同位体濃縮効果が存在することを確認している。

また、前述した本田(1991)は、富山県黒部川扇状地において黒部川・小川の河川水、浅層・深層32本の地下水サンプルの安定同位体比を測定した結果、扇状地の地下水には、流域の平均標高が高い(1600m)黒部川から涵養が卓越する地域が明瞭に区分できることを示した。このように、いずれの研究例においても、降水中の安定同位体比の高度効果は、水循環の実態把握に有効に利用できることが示された。

IV おわりに

以上、筑波大学地球科学系水文学研究室における環境同位体を利用した水循環の研究を概観してきた。

水文循環の中の様々な水体に対し、水分子の一部を構成し水分子と共に挙動するトリチウム、安定同位体（重水素、重酸素）等の環境同位体は、循環の実態を把握する上で有効な天然トレーサーとして利用できることが数多くの研究例を通じて示されてきた。今後は、この種の研究をさらに蓄積してデータベース化を図ると共に、これまで手掛けられていない水蒸気、氷河、凍土、深層地下水等の水体における水の挙動把握に関する研究や、国外の異なる気候環境下での水文循環の実態把握に環境同位体手法を適用することにより、水循環の地域特性を捉える研究を展開して行きたいと考えている。

文 献

- 榎根 勇・田中 正・嶋田 純 (1980) : 環境トリチウムで追跡した関東ローム層中の土壌水の移動. 地理評, **53**, 225-237.
- 榎根 勇・李宝 慶 (1983) : トリチウム濃度から推定した筑波研究学園都市の地下水の年齢. 筑波の環境研究 7号, 124-127.
- 近藤昭彦・鈴木裕一・高山茂美 (1983) : トリチウムによる地下水の滞留時間の推定—会津盆地北部の自噴井の場合—. ハイドロロジー, No.13, 60-65.
- 近藤昭彦 (1985) : 下総台地南縁部の小流域における湧水期の流量と地形との関係について. ハイドロロジー, No.15, 114-121.
- 近藤昭彦 (1985) : 環境トリチウムによって明らかにされた市原地域の地下水流動系. 地理評, **8**, 168-179.
- 佐藤正・市川正巳・榎根勇・海老原寛・新藤静夫・青木直昭・小沼直樹・田中正 (1979) : 筑波地区における深層地質および深層地下水の地球科学的研究. 筑波の環境研究 4号, 136-147.
- 佐藤芳徳・榎根 勇 (1982) : 三方五湖の湖水のトリチウム濃度. ハイドロロジー, No.12, 31-33.
- 佐藤芳徳 (1983) : 中禅寺湖における湖水の混合とトリチウム収支. 地理評, **56**, 667-678.
- 佐藤芳徳・森 和紀・塚田公彦・榎根 勇 (1984) : トリチウム濃度でみた池田湖の鉛直混合の検討. 地理評, **57**, 122-129.
- 三條和博 (1987) : 関東地方小流域のトリチウム濃度. ハイドロロジー, **17**, 25-35.
- 嶋田 純 (1977) : 天然水中のトリチウム濃度測定. ハイドロロジー, No.8・9, 24-29.
- 嶋田 純 (1989) : 地下水の3次元流動把握指標としての水の安定同位体の有効性. 筑波大学水理実験センター報告, **13**, 63-70.
- 嶋田 純 (1978) : 降水中のトリチウム濃度の時系列変化と降水の起源となる気団の関係. Radioisotopes, **327**, 09-714.
- 杉沢 登 (1980) : 波崎砂丘における地下水の流動. 筑波大学自然学類昭和54年度卒業論文.
- 鈴木裕一・高山茂美・開発一郎 (1981) : 会津盆地北部の自噴井について. ハイドロロジー, No.11, 41-46.
- 高瀬 修 (1978) : 環境トリチウムの時間的, 空間的変化に関する研究—長岡, 筑波, 東京において—. 筑波大学自然学類昭和52年度卒業論文.
- 本田明子 (1991) : 環境同位体を用いた黒部川扇状地に於ける地下水流動の研究. 筑波大学自然学類平成2年度卒業論文.
- 田中 正・間島政紀・佐藤芳徳 (1980) : 蓮沼川および西谷田川の流出特性について. 筑波の環境研究 5 A号, 20-25.
- 平田重夫 (1971) : 本郷台, 白山における不圧地下水の涵養機構. 地理評, **44**, 11-46.
- 表 相根, 榎根 勇 (1987) : 洪積台地における地下水の三次元的流動—環境トリチウムと水質による地下水の循環と滞留時間. 地下水学会誌, **29**, 2.89-98.
- Dinçer, T., *et al.* (1970) : Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen—18. *Water Resour. Res.*, **6**, 110-124.
- Fritz, P., *et al.* (1976) : Runoff analysis using environmental isotope and major ions. in *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrological Data in Groundwater Hydrology*. IAEA, Vienna, 111-130.
- Kondoh, A. (1985) : Study on the groundwater flow system by environmental tritium in Ichihara region, Chiba prefecture. *Env. Res. Cen. Pap., Univ. Tsukuba.*, No.6, 59p.
- Sanjo, K. (1991) : Isotope hydrology of Mt. Tsukuba. *Science Reports of the Institute of Geoscience, Univ. of Tsukuba, Sect. A*, **12**, 1-36.

Satoh, Y. (1986) : A study on thermal regime of Lake Ikeda. *Sci. Rep. Inst Geosci., Univ. Tsukuba*, Sect. A, 7, 55—93.

Shimada, J. (1988) : The mechanism of unsaturated

flow through a volcanic ash layer under humid climatic conditions. *Hydrological Processes*, 2, 43—59.