

41. 扇状地研究その6. 環境同位体による愛知川扇状地の地下水流動解析

Study on Alluvial Fan Part7. Groundwater Flow in the Echi-river Alluvial Fan

Estimated by Environmental Isotopes

○山田 誠(岡山理科大学, オープンリサーチセンター),
小林正雄(大阪教育大学),
大石 朗(八千代エンジニアリング(株)),
扇状地水環境研究会
Masao Kobayashi, Makoto Yamada, Akira Oishi
Research group on Hydro-environment around alluvial fans

1. はじめに

愛知川扇状地は滋賀県で最も地下水利用率が高い地域で、水道水は全て地下水を利用している。近年扇状地内で砂利採取が行われており、その跡地へ汚泥や各種廃棄物が埋設され、それらの汚染物質による水源の水質汚染が懸念されている。このような汚染物質による地下水水質への影響評価や将来の地下水の保全・管理対策を立案するためには、地表水との交流関係を含めた流域内の地下水流動機構の解明が必要である。

本研究は水文学的・同位体的手法および地形・地質情報により、特異な流域形態を持つ愛知川扇状地の水循環機構を明らかにすることを最終目的とするが、今回は、その第1報として扇状地及びその周辺地域で実施した地下水、湧水、河川水の酸素・水素同位体比とトリチウム濃度の調査結果に基づいて、それらの水平分布の特徴、

および浅層・深層地下水(G.L-約130mまで)の流動状況の概要を報告する。

2. 調査地域の概要

愛知川は鈴鹿山系に広い集水域を持つ、流域面積202km²、河川長約49kmの滋賀県有数の河川で、東方の山地の出口から西方に典型的な扇状地を形成している。調査地には古琵琶湖層群の最上部層である八日市累層(層厚50~100m)が分布している。この層の土質は部分的にシルト、シルト質砂を挟在するが、全体に中礫やチャートの円礫で構成されている。また、その上位は新・旧段丘礫層、沖積層の順に構成されている。新・旧段丘礫層はその境界に1~2mの粘土・シルト層を挟在するが、全体に玉石を多く混えた粗粒な砂礫から成り、透水性は極めて良好である。沖積層は薄層で細粒土から成り、難透

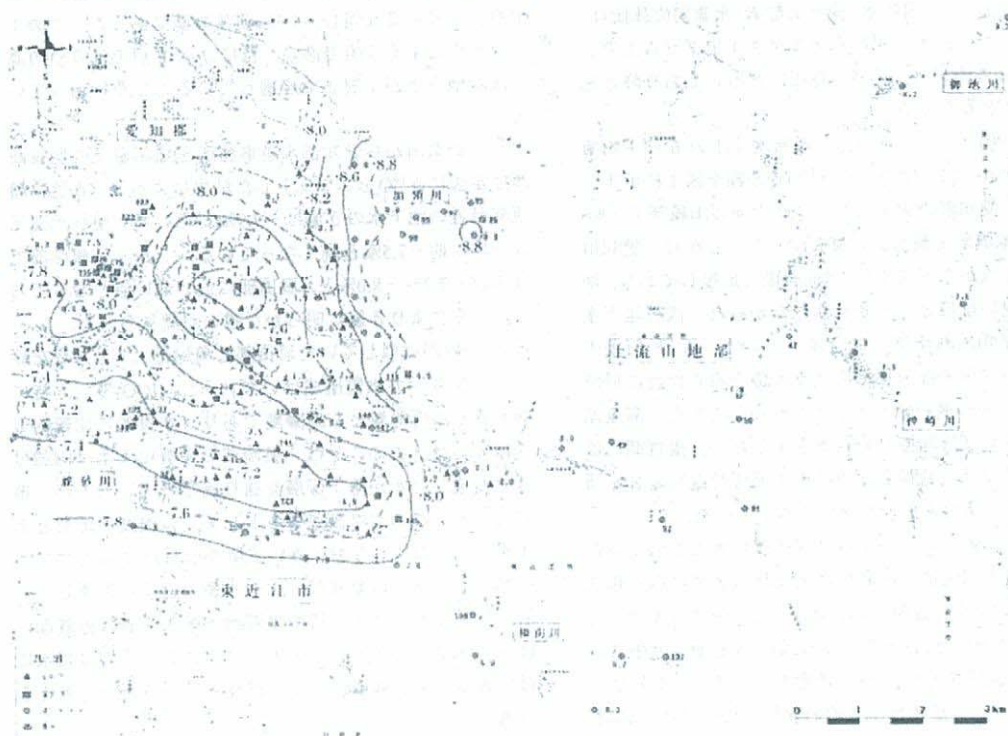


図1 愛知川扇状地の河川水・浅層地下水・湧水の酸素安定同位体比等値線図
(4, 5, 8, 10, 11, 12月の平均値)

水から不透水層を形成している¹⁾。これらの各地層中には2～5層の良好な帯水層が存在する。また、浅層地下水の水面は全体にGL-8～-20m付近にあるが、どの地域も深層地下水の水面より数m～20m程度高い。また、浅層地下水の地下水面勾配は、愛知川の右岸側が1/40(扇頂部)～約1/90(扇尖・扇端部)、右岸側が1/50(扇頂部)～1/150(扇尖・扇端部)と全体に右岸側の勾配が大きい。なお、山地の出口よりやや上流に農業用水用の永源寺ダムが設けられており、5月～9月頃まではダム水の多くは灌漑用水として水田に配水されている。そのため、下流では河川流量が少なく枯川となっていることが多い。

3. 調査方法

調査は継続中であるが、主な期間は2004年10月～2005年11月の約1年間である。この間、主に、灌漑期と非灌漑期に酸素・水素同位体用の試水を浅井戸(42地点)、深井戸(19地点)河川水・湧水(31地点)で、また、これらの地点中、浅井戸(8地点)、深井戸(12地点)および河川水、湧水4地点でトリチウム用の試水を採取した(図1)。深井戸では開放井戸(大口径)やボーリング井戸(小口径)でストレーナーが切っている3～5層の水を深度別に各層採取した。試水は現地でも電気伝導度(以下EC)、pH、水温を測定した後、ニュージーランドの分析機関(Geological & Nuclear Sciences)に送付し分析した。

4. 結果と考察

4. 1. 酸素・水素同位体比

本地域の地下水、河川水、湧水の酸素・水素同位体比は、図示していないが、いずれもデルタダイアグラム上で天水線($\delta D=8\delta^{18}O+10\sim 17$)の範囲に分布しており降水起源であることが分かる。

結果の一例として、河川水、浅層地下水の6回平均値(4, 5, 8, 10, 11, 12月)の $\delta^{18}O$ 等値線を図1に示す。河川水は、愛知群の加領川およびその周辺山麓部で-8.6～-8.8%と本流域で最も低い値を示した。しかし、愛知川は全体に上流から下流まで-8%前後で推移しており、地点による違いはほとんど認められなかった。浅層地下水の δ 値は愛知川右岸側では全体に-7.8～-8.2%前後の値を持つが、扇尖部の加領川と支流の合流点付近に局部的に約-7.3%の高い値を示す水が存在していた。灌漑期と非灌漑期もほぼ同様な分布型を示したが、灌漑期には扇尖部と扇端部(名神高速道路の下流部付近)の2ヶ所に局部的で δ 値の高い地下水が分布していた。

一方、左岸側では図のように周辺部に水田が広く分布する愛知川の旧河道と蛇砂川に挟まれる区域に広く帯状に-7.2～-7.4%と δ 値の高い地下水が分布していた。これは、 δ 値の高い水(おそらく灌漑水)が浅層地下水中に浸透し、西方(琵琶湖方向)に向って流動していることを物語っている。しかし、扇頂部や下流の愛知川沿いでは-8%前後の比較的低い値を持つ地下水が分布している。このよ

うな δ 値は河川水の値(-8%前後)とほぼ同程度であることから、河川伏流水の浸透によるものと思われる。灌漑期、非灌漑期とも平均値とよく似た分布を示したが、 δ 値は全体に灌漑期が非灌漑期より-0.2～-0.3%高く、また δ 値の高い区域も拡大していた。図示していないが、このような $\delta^{18}O$ の分布は地下水面等高線図より推定された地下水の流動方向ともよく一致していた。すなわち、愛知郡側で局部的に高い δ 値を示した区域は、地下水の推定流線が収斂しているところと一致していた。また、左岸側では愛知川旧河道沿いに上流から下流に向かう流れと優勢な流れとが認められ、これらの結果は、本地域の浅層地下水、特に高い δ 値の地域の地下水は灌漑水の浸透の影響を強く受けていること、また、その影響が非灌漑期にも持続していることを示唆する。

深層地下水の酸素・水素同位体比については、各試水とも同一井戸のストレーナーが切っている層(3～5層)から採取されたものであり、その代表性に問題が付随する。得られた結果の多く、特に大口径の井戸では明瞭な鉛直変化は認められず、各帯水層の水が井戸内で混合している可能性が高い。しかし、井戸の口径小さい所で、例えば、加領川扇尖部(H-1)では上層と下層で-7.3～-7.6%と若干の鉛直変化が認められた。大口径の深井戸では明瞭な鉛直変化はみられなかったが、H-1の下流に位置する深井戸(中戸新1号)や、さらに下流の扇端に位置する深井戸7号は、それぞれ約-7.7%、-7.2%と δ 値に明らかな違いが認められた。特に、深井戸7号は深井戸の中では最大値を示したが、その近傍に位置する深井戸は中戸新1号とほぼ同じ-7.7%前後の値であった。このような地点による δ 値の違い、特に7号井戸では δ 値の高い浅層地下水が下層まで浸透していることを物語っている。

また、加領川から愛知郡水道事務所を結ぶ線上の地質断面推定図に $\delta^{18}O$ をプロットした結果によると、 δ 値は扇頂部付近の地下水の δ 値は-7.9%と低いが、扇尖部付近では全体に約-7.5%と高くなっている。しかし、扇端部では再び-7.7～-8.0%と、扇頂部に近い低い値となっており、場所により δ 値に明らかな違いが認められた。

$\delta^{18}O$ 値が近似していた扇頂部と扇端部(7号井戸を除く)の深井戸の水質組成はいずれもCa-HCO₃型で、特にSiO₂濃度は両地域とも高濃度であり、水質的に比較的よく似ていた。このことは、扇端部の深層地下水は山麓付近で浸透した水が地下深層を通り流動しているものと推定される。この点は後述するトリチウム濃度の結果とも矛盾していない。なお、高い δ 値を示した7号井戸について、この井戸は愛知郡の水道水源の近くに位置していること、また、この周辺の浅層地下水の δ 値は灌漑期には-7.2%前後と高い。したがって、この井戸では揚水に伴い δ 値の高い浅層地下水が混合しているためと考えられる。

4. 2 トリチウム濃度と地下水の滞留時間

今回得られた本地域のトリチウム濃度(単位はTU. TUはTritium Unitの略で、水素原子 10^{18} 個中にトリチウム原子1個が含まれるとき、その値を1TUとする)の頻度分布を図2に示した。約6割の試料が3~4TUの範囲の値を示すが、それより高いトリチウム濃度と低いトリチウム濃度を示した試料もいくつか存在し、本地域のトリチウム濃度にバリエーションがあることがわかった。そこで、ピストン流

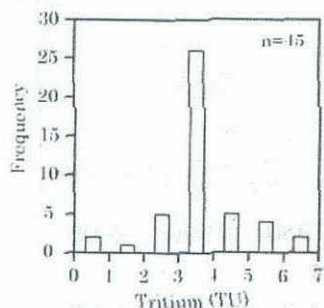


図2. トリチウム濃度の頻度分布

モデルを用いて、およびその滞留時間を見積もった。

ピストン流モデルでは、地下水のトリチウム濃度は放射壊変のみで減衰する。地下水のトリチウム濃度Cは以下の式で表すことができる。

$$C = C_0 e^{-\lambda t}$$

ここで、 C_0 、 λ 、 t はそれぞれ供給される地下水のトリチウム濃度、壊変定数および滞留時間である。供給される地下水のトリチウム濃度には、関東で測定された降水の年平均値²⁾を用いた。なお、2003年以降のデータがなかったため、2003年~2006年のデータとして藪崎ほか(2003)の2002年の降水の平均トリチウム濃度を用いて解析を行った。図3に、上記の式と降水のデータを用い

て計算した、5、10、20、30年経過した場合のトリチウム濃度の値(図中の実線)および観測値を示した。なお、観測期間中の降水のトリチウム濃度の測定は行っていないため、降水の値の参考値として前述の2002年の文献値(4.1 ± 0.3 TU)を図中に示している。

観測値は大きく以下の4つのグループに分類される。

- A. 降水よりも高いトリチウム濃度のもの
- B. 降水とT=5の実線に囲まれる範囲にあるもの
- C. T=10とT=20の実線に囲まれる範囲にあるもの
- D. T=20よりも低いトリチウム濃度のもの

これらのグループに属する試料水がどのような滞留時間を持つのかをさらに詳しく見るために、それらの水が経てきたトリチウム濃度の変遷(破線)と過去の降水のトリチウム濃度(実線)を図4に示した。なお、初期値には各グループの代表値として、それぞれのグループの平均トリチウム濃度を用いている。

破線と実線の交点の年がそのグループの水が地下に涵養した年と考えられるが、グループDを除く3つのグループで複数の交点が存在する。細かく見ると、最も現在に近い交点は、グループAで1972年、グループBで2002年、グループCで2000年となっている。それ以前にも交点は存在するが、これらのグループの水は少なくともグループAで30年、グループBで3年、グループCで5年以上の滞留時間を持っていると考えられる。また、交点が存在しないグループDの水は1950年以前に涵養したものと考えなければその値は説明がつかない。したがって、この水の滞留時間は50年以上であると考えられる。

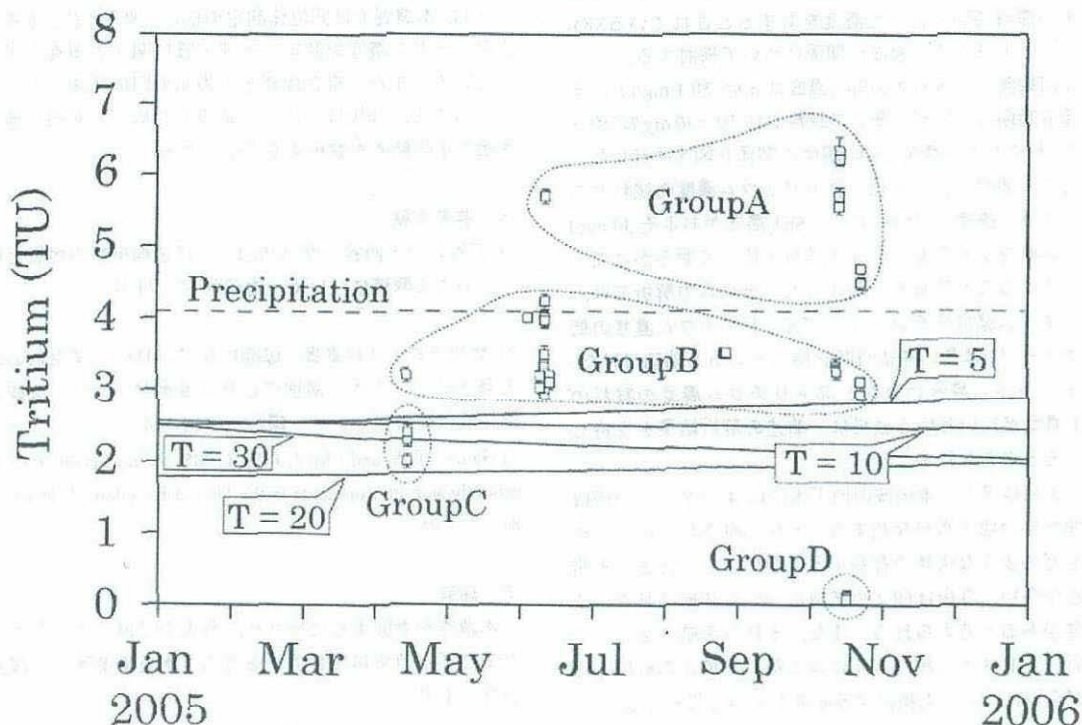


図3 ピストン流モデルによる地下水の滞留時間解析結果

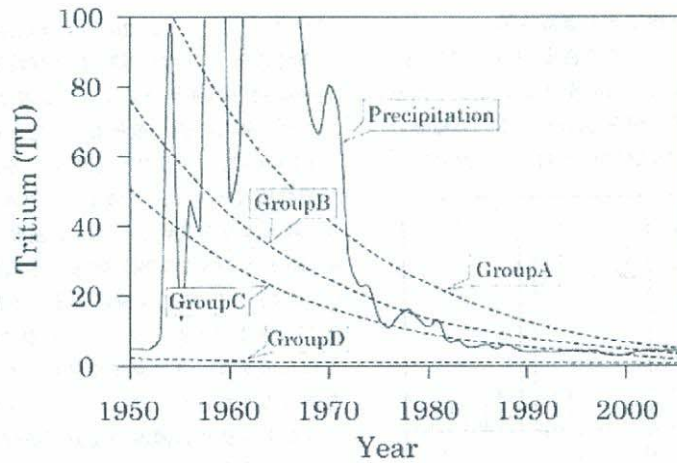


図4 降水のトリチウム濃度と地下水のトリチウム濃度の変遷

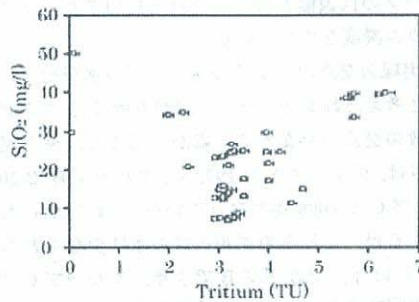


図5 トリチウム濃度とSiO₂濃度の関係

ここまで、トリチウム濃度のみを用いた解析を行ってきたが、その他の化学成分との関係はどうであろうか。これまでの解析の妥当性を検証するために、ここでは地下水の滞留時間に応じた濃度を有するとされているSiO₂濃度³⁾とトリチウム濃度の関係について検討する。

今回観測した試料水のSiO₂濃度は6.8~50.1 mg/lと、その濃度範囲は広いが、多くの試料水は10~30 mg/lの値を取る。トリチウム濃度とSiO₂濃度の関係を図5に示した。

ここで着目したいのは、低トリチウム濃度の試料と高トリチウム濃度の試料は共に、SiO₂濃度がおよそ30 mg/l以上の値を示しており、他の試料と比べて明らかに高くなっていることである。前述のトリチウムの解析では、トリチウム濃度の高いグループAとトリチウム濃度の低いグループDは長い滞留時間を持っていると結論付けた。低トリチウム濃度の試料と高トリチウム濃度の試料のSiO₂濃度が高いという結果は、前述の解析結果を支持していると考えられる。

以上の結果で、本地域の地下水には4パターンの滞留時間を持つ地下水が存在することが示唆されたが、これらがどのような条件で存在するのかについてはまだ不明な点が多い。今後は個々の試料について詳細に見ていく必要があると考えられる。また、それらを踏まえて、今回行ったピストン流モデルによる解析が最良の解析方法かどうかについても検討する必要があると思われる。

5. まとめ

愛知川扇状地で河川水、地下水の環境同位体調査した結果、以下のことが分かった。

1. 愛知川の酸素同位体比は季節的にも、流程によっても-0.2~0.3‰の範囲にありほとんど変化がみられない。
2. 浅層地下水は、愛知川右岸側では全体に山麓部から扇端部に向かい高くなるが、扇中部で局所的に高い値を示す区域が分布する。また、左岸側では愛知川旧河道沿いに、扇頂部付近から扇端部にかけて帯状に高いδ値を示す区域が分布する。しかし、丘陵部の河川水と愛知川河道周辺部では-7.8~-8.2‰程度の低いδ値を示す。
3. トリチウムの解析結果から、大きく分けて滞留時間が異なる4種類の地下水が認められた。

なお、本調査では同位体測定他に、地下水位、水質、水温、ラドン濃度の測定、水理地質に関する調査も実施している。また、現在灌漑水や降水の同位体測定も行っているため、今後はこれらの結果も含め、本地域の地下水地下水流動系を解析する予定である。

6. 参考文献

- 1) 高谷好一・西谷一彦(1964)：琵琶湖東岸の地質と地下水の流出機構について、地球科学、74号。
- 2) 荻崎志穂・辻村真貴・田瀬則雄(2003)：関東における降水のトリチウム濃度の近年の変動について、筑波大学陸域環境研究センター報告、4、119-124
- 3) Haines, T. S. and Lloyd, J. W. (1985)：Controls on silica in groundwater environments in the United Kingdom. J. Hydrol., 81, 277-295

7. 謝辞

本調査を実施するに当たり、多大のご協力をいただいた愛知郡水道事務所および東近江市水道事業所には深謝いたします。