

酸素同位体比を指標とした地下水涵養源推定の試み 酒匂川右岸地域の自噴地下水を例として

板寺一洋*

1. はじめに

地下水や温泉水の開発と保全の問題を考える場合、これらの水が、どこで涵養されているのか、どの位の時間をかけて流動しているのか、どのような地層を流れているのか、量はどのくらいか等を明らかにすることが求められる。

そのために必要な調査項目として、水質や水温など水それ自身が持っている情報に着目し、地下水流動過程について解析する試みが多くなされている。

水分子(H₂O)を構成する酸素(O)と水素(H)には、それぞれ3種類(¹⁶O、¹⁷O、¹⁸O)と2種類(¹H、D)の安定同位体が存在する。同じ元素の安定同位体どうしは、化学的性質は同じだが、質量数が異なっていることから、自然界を循環する水は、いわば、重さの異なる水分子の“混合物”であると言える。ある水(または水蒸気、氷)中における軽い同位体(¹⁶O、¹H)に対する重い同位体(¹⁸O、D)の存在比を、その水の酸素および水素の安定同位体比(以下、同位体比)と呼ぶ。

地球上を循環している水の同位体比は、蒸発、凝結といった相変化にともなうふるい分け(分別)によって変化する。一方、熱水系のような高温・高圧の条件を除けば、地層との化学反応によって変化しない(水谷、1986)。したがって、ひとたび地下水として涵養された水の同位体比は、それが流動する間は保存され、異なる同位体比を有する水と混合しない限り変化しないと考えられる。地下水を涵養するのは雨水であるから、あらかじめ、対象とする地域の雨水の同位体比の空間分布の状況を把握しておけば、地下水の同位体比を、その起源や涵養源に関わる指標として活用することができる。

雨水の同位体比については、標高や海岸線からの距離に応じた空間分布を示すこと(高度効果や内陸効果)が知られている。本稿では、酒匂川水系における雨水の同位体比の空間分布状況の把握を試み、酒匂川右岸地域に分布する自噴地下水の涵養源について検討した結果について報告する。

なお、今回の対象地域を含む酒匂平野の地形・水文地質等については、すでに多くの報告(たとえば小沢ほか、1982や荻野ほか、1988)が行われているので、そちらを

参照されたい。

2. 酸素同位体比の分析法および表記法

水の酸素同位体比は、液相-気相間の同位体交換反応の温度依存性を利用し、25℃の温度下で試料水と同位体平衡に達した二酸化炭素(気体)を質量分析することで測定される。本報告における酸素同位体比の分析は、標準試料として研究所にて精製した蒸留水[¹⁸O = -8.52‰

(VSMOW)]を用い、温泉地学研究所の軽元素質量分析装置(VG(現Micromass)社PRISM)および自動平衡装置(ISOPREP18)により行った。

同位体比の表記には、同位体の存在比(絶対値)よりも、国際原子力機関(IAEA)によって定義された標準平均海水(VSMOW)中の同位体存在比を基準とした千分率偏差(‰)が用いられることが多い。酸素同位体比を表す¹⁸O値は次式により定義される。

$$^{18}\text{O} = (R / R_{\text{SMOW}} - 1) \times 1000$$

¹⁸O : 試料の酸素同位体比(‰)

R : 試料中の同位体存在比

R_{SMOW} : 標準平均海水中の同位体存在比

一般に、‰値が大きいほど、重い同位体に富むことから重い水、逆に、‰値が小さいほど軽い水と呼ばれる。

3. 酒匂川水系表流水の同位体比の空間分布

雨水の同位体比の空間分布を把握するといっても、実際には、降雨イベントごとに同位体比の変動が大きく、系統的に地域を代表するような雨水の採水には多大な労力をとらなければならない。そこで、雨の直接的な影響が少なく、河川水が地下水流出成分のみからなるとみなせる時期(基底流出時)の河川水を採水し、その同位体比を、流域に涵養された水の平均的な値とみなして標高との関係を把握した。採水は、1987年10月と、1998年8月に行っ々採水地点を図1に示す。

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告 第31巻, 第1号, 53 - 56, 1999

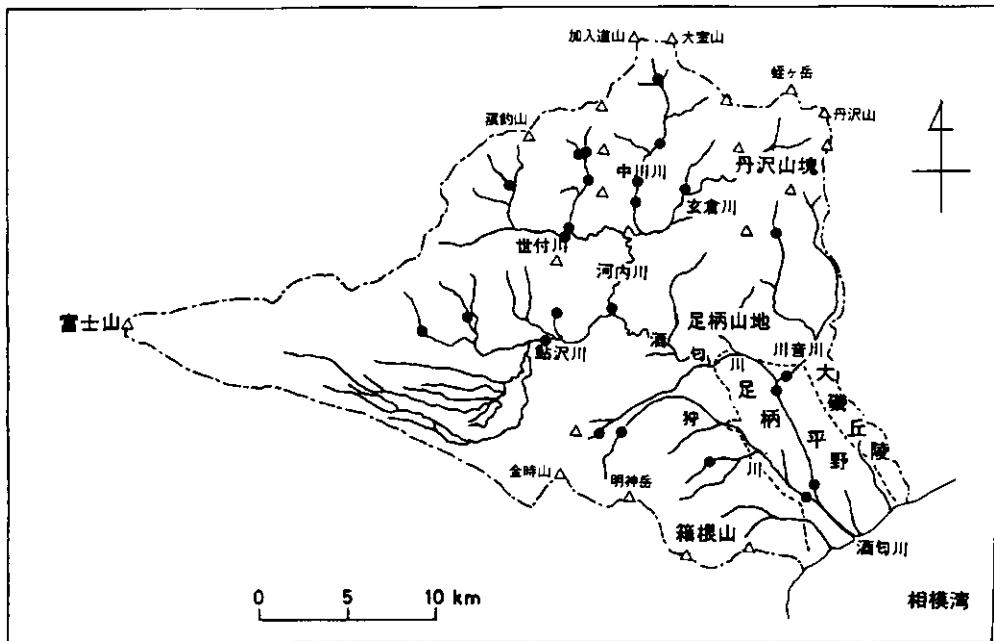


図1 酒匂川水系の河川水採水地点（荻野ほか；1988 に加筆 ●は採水地点を示す）

採水試料の酸素同位体比と採水地点の標高との関係(図2)によれば、時期により、また採水地点標高が低い場合にばらつきが多いものの、標高の高い地点ほど、基底流出時の河川水の同位体比は小さくなっている。採水地点が代表する範囲については検討を加える必要があるものの、この結果は、酒匂川水系において、標高の高い地点ほど軽い地下水が存在していること示しており、それを涵養する雨水も標高の高い場所ほど軽いこと(同位体高度効果)を示している。その割合は標高100mにつき、最大で0.2‰程度であることがわかる。これは早稲田・中井(1982)による中部日本の割合(標高100mにつき0.23‰)と同程度である。

4. 酒匂川右岸地域における自噴地下水の同位体比

酒匂水系の最下流部に広がる足柄平野は、中～下流部にかけて、今なお多数の自噴井が分布しており、地下水の豊富な地域として知られている。この自噴地下水については、箱根外輪山系の地下水と足柄平野系の地下水とが、明瞭な水質差を示しながら近接しており(湧水調査グループ、1991) 深部における両者の交流状況、具体的には、箱根外輪山系の地下水が、平野部の地下水の涵養に、どのように寄与しているかの解明が課題となっている(たとえば横山ほか、1999)

日比野ほか(1999a)は酒匂川右岸地域の自噴地下水に

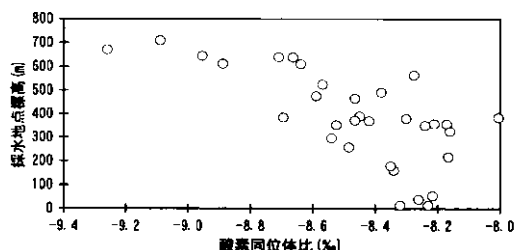


図2 酒匂川水系河川水の酸素同位体比と採水地点標高の関係

ついて主要成分の分析を実施している。その結果によれば、試料の大半は足柄平野系の水質を示しているものの、箱根外輪山系に近い水質を示すものも認められる。箱根外輪山と足柄平野の間には、最大で1000mを越える標高差があり、同位体高度効果に基づいて地下水涵養源を推定する手法が有効であると考えられる。そこで、同じ試料の酸素同位体比について検討した。対象とした試料は、図3に示した地点において1996年10月から11月にかけて採水されたものである。試料数は十分とは言えないが、この地域に分布する300井を超える自噴井を対象に行った悉皆(しっかい)調査において選択されたものであることから、ある程度の代表性は期待できるものと考えた。

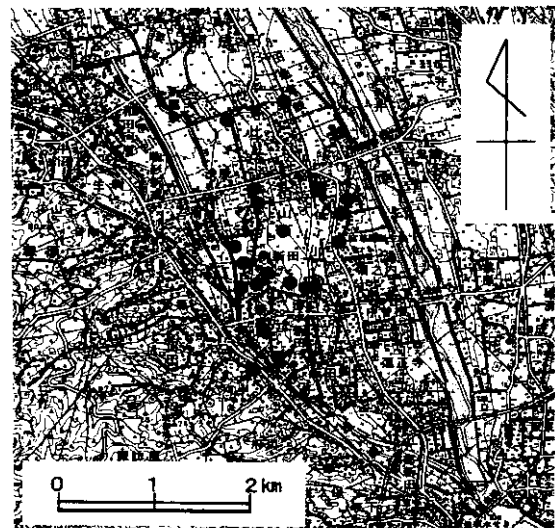


図3 対象とした酒匂川右岸地域の自噴井の位置(●は採水地点を示す 国土地理院発行50,000分の1地形図「小田原」の一部を利用)

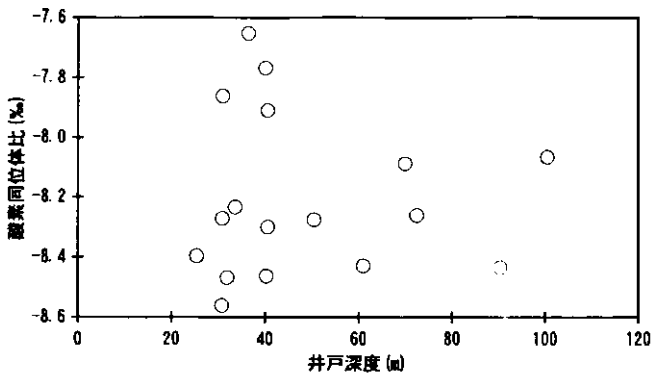


図4 自噴井の深度と地下水の酸素同位体比の関係

一般に、深部の地下水ほど、標高の高い場所あるいは遠方で涵養されていると考えられる。したがって箱根外輪山系の地下水では、雨水の同位体高度効果により、深度が大きいほど低い同位体比を示すことが予想される。一方、平野部で涵養を受けた地下水の場合、図3に示したような比較的狭い地域内では、同位体比の空間的なばらつきは小さくなることが予想される。

酸素同位体比の分析結果と井戸深度との関係(図4)について見ると、深度が約40mより浅い井戸では同位体比のばらつきが大きく-8.6 ~ -7.6‰の範囲の値を示すのに対して、それ以降では同位体比のばらつきが小さくなっている。したがって、これらの地下水が、箱根外輪山系あるいは足柄平野系の、いずれか一方に該当することを示す明らかな傾向を見いだすことはできない。

5. 考察

同位体比と並んで、地下水涵養高度の影響を受けると考えられる水質項目として水温を挙げることができる。標高が高いところほど気温が低く、雨水の温度も低いことから、高い場所で涵養された地下水ほど水温が低いと考えることができる。特に、地下水の流動が顕著な場合は、それに伴う熱の移流により、地温分布に影響を及ぼすことが知られている。

地下水の流れが無いが、それに近いとみなせるほど遅い場合、地温の分布状況は、地下深部からの熱伝導と、地表面温度の変化の影響により決定され、次の一次元熱伝導方程式に従う。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (1)$$

θ: 地温、t: 時刻、Z: 深度、α: 地層の温度拡散率

図5は神奈川県気象月報に基づく小田原の月平均気温の準平年値の変化を示したものである。図中、実線で示したとおり、小田原地域の気温年変化は、一年を周期Tとし、1月に最低値、8月に最高値をとる正弦波(A₀ + A ·

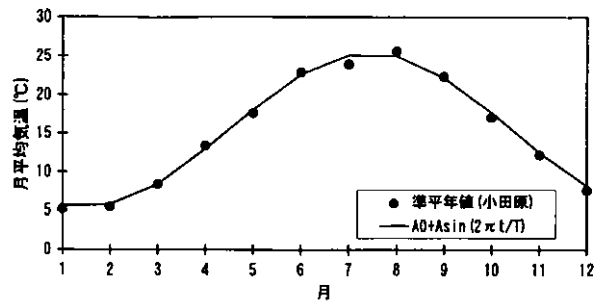


図5 小田原の月平均気温の準平年値と正弦波による近似値

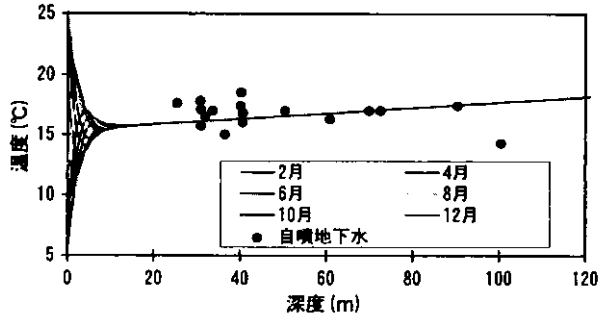


図6 一次元熱伝導方程式の解析解による地温分布と自噴地下水温の比較

sin

(2 · t/T))で近似することができる。ここで、A₀とAは、神奈川県気象月報に掲載された小田原の月別平均気温の準平年値に基づき、それぞれ、1月~12月の平均値15.4、8月と1月の差の半分の10.2を与えた。

地表面温度がこれに対応して変化すると仮定し、地中増温率をCとすれば、(1)式の解析解は次式で表される。

$$\theta(z,t) = A_0 + A \cdot \exp(-z\sqrt{\alpha/T}) \cdot \sin(2\pi t/T - z\sqrt{\alpha/T}) + C \cdot z \quad (2)$$

本稿では、に砂礫を主体とする地層の温度拡散率として谷口(1985)が採用している $6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ を用いた。また、大山ほか(1998)は、深層ボーリングの孔底温度から神奈川県を東西に切る断面において深度500、1000、1500、2000mにおける地温をそれぞれ30、40、45~55、60~70としており、これに基づく地温勾配の平均値 $2.3 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ をCの値として用いた。

図6は、(2)式に基づいて計算した各月の地温分布の状況に、自噴井の深度と地下水温の関係を重ね合わせた結果である。この図から、恒温層深度は約15mであることが読みとれる。今回、対象とした自噴井の深度は、いずれもこれより深く、自噴地下水の温度は気温変化の直接的な影響を受けていないことになる。したがって、図6に示した計算結果と地下水温の分布状況の差は、地下水流動の影響を反映しているものと考えられる。そこで、(2)式の計算結果による地温分布を基準として、水温によって自噴地下水を分類した(図7)。

その結果、温度の高い自噴地下水は、井戸深度が 20 ~ 50m と相対的に浅く、酸素同位体比が - 8.2 ~ - 8.6‰

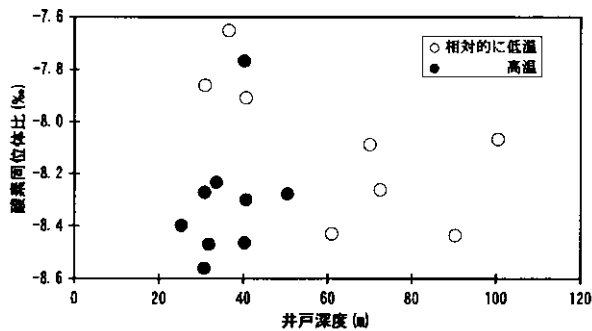


図7 自噴井の深度と地下水の酸素同位体比の関係 (地下水温にもとづく区分を行った場合)

の範囲の値を示しており、ばらつきが小さいことがわかる。

横山ほか(1988)は水温を指標とした解析結果から、足柄平野の浅層に、夏季に酒匂川河床や平野部の水田から浸出した温かい水が、冬季にかけて、徐々に地下に浸透していく様子を追跡している。水田への灌がい水の大半は酒匂川から分水した用水である(日比野ほか、1999b)こと、酒匂川本流の河川水の酸素同位体比が - 8.2 ~ - 8.6‰の値を示している(図2)ことから、相対的に高温な自噴地下水は、酒匂川河川水が河床あるいは水田から浸透することにより涵養された水である可能性が考えられる。

一方、温度の低い自噴地下水は、井戸深度が深いものほど低い同位体比を示している。この傾向は、斜面で涵養された地下水系の場合に予想される傾向と適合することから、箱根外輪山系の地下水に相当する可能性が考えられる。

6. まとめ

酒匂川水系における雨水の同位体比の空間分布状況の把握し、酒匂川右岸地域に分布する自噴地下水の涵養源について検討を加えた。その結果は次のようにまとめることができる。

降雨の直接的な影響が少ないと思われる時期の河川水の酸素同位体比の分析結果から、酒匂川水系における雨水の同位体高度効果の割合は、標高差 100m につき最大で 0.2‰程度と見積もることができる。

また、酒匂川右岸地域の自噴地下水を水温に基づいて区分し、各々の酸素同位体比について検討した。その結果から、相対的に高温の地下水が酒匂川や平野部の水田から浸透した水を起源とし、相対的に低温の地下水が箱根外輪山系の地下水起源である可能性が大きい。

本報告では、酒匂川右岸地域に多数分布する自噴地下水の一部を対象としたにすぎないが、地下水涵養源推定のための指標として同位体比の有効性を示すことはでき

たと考えている。この地域を含めた足柄平野地域の地下水については、主要成分に基づく明確な地下水の区分がされている。それらの知見と併せて、雨水・表流水・地下水の同位体比の時空間分布も解析し、地下水涵養源の特定を進めることにより、地域の水循環の実態を解明することができるであろう。

謝辞

本研究は平成9・10年度の温泉地学研究所経常研究の一環として行った。酒匂川水系河川水の採水は温泉地学研究所宮下雄次技師と共同で行った。また、長瀬和雄所長(当時)をはじめ、所員の皆様には、所内談話会等の機会を通して、貴重なご意見をいただいた。記して感謝いたします。

なお、本報告の一部は平成11年度温泉地学研究所研究成果発表会で発表したものである。

参考文献

- 日比野英俊、粟屋徹、板寺一洋、横山尚秀、長瀬和雄、平野富雄(1999a) 酒匂川右岸地域の自噴井戸, 温地研報告, Vol. 30, No. 1・2, 19-32.
- 日比野英俊、粟屋徹、板寺一洋、横山尚秀、長瀬和雄、平野富雄(1999b) 南足柄の農業用水と湧水, 温地研報告, Vol. 30, No. 1・2, 33-40.
- 水谷義彦(1986) 水文学に望まれる諸問題 - 安定同位体水文学一, ハイドロロジー, Vol. 16, No. 2, 74-82.
- 荻野喜作、横山尚秀、大木靖衛(1988) 酒匂川流域の水涵養機能評価, 温地研報告, Vol. 19, No. 4, 79-80.
- 大山正雄、粟屋徹、板寺一洋(1998) 平成9年度神奈川県温泉地学研究所事業概要. 小沢清、荻野喜作、横山尚秀(1982) 足柄平野の地質(その1), 神奈川県温地研報告, Vol. 13, No. 5, 83-90.
- 谷口真人(1985) 長岡市周辺における地中温度形成に及ぼす積雪および融雪浸透水の影響, 地理学評論, Vol. 58 (Ser. A), No. 6, 349-369.
- 湧水調査チーム(1991) 湧水調査結果報告, 神奈川県温泉地学研究所, 38p.
- 横山尚秀、荻野喜作、平野富雄、大木靖衛(1988) 水温を指標とした足柄平野上部の地下水流動機構調査, 温地研報告, Vol. 19, No. 4, 21-30.
- 横山尚秀、板寺一洋、日比野英俊(1999) 足柄平野の地下水賦存特性と自噴帯, 日本水文科学会誌, Vol. 29, No. 2, 81-92.
- 早稲田周、中井信之(1983) 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成, 地球化学, 17, 83-91.