

神奈川県各地の温泉水の水素および酸素安定同位体比の特徴

石坂信之*、栗屋 徹*

Stable Isotopic Ratios of Hydrogen and Oxygen in Kanagawa Hot spring Waters

by

Nobuyuki ISHIZAKA * and Toru AWAYA *

Abstract

Stable hydrogen and oxygen isotopic ratios of typical hot spring waters were measured in Kanagawa prefecture. The result showed the following features. (1) The hot spring waters at Hakone Yumoto contain a volcanic thermal water. (2) The hydrogen and oxygen isotopic ratios of the hot spring waters around Tanzawa areas are most similar to the local meteoric water origin. (3) The high salinity of water from Tsurumaki represents a dilution of fossil sea water.

1. はじめに

水を構成する水素と酸素の安定同位体比について、Craig(1961)は、世界各地の河川水、湖水および降水の水素、酸素安定同位体比(以下、水素、酸素同位体比とする)を調べ、水素同位体比と酸素同位体比の間には、一定の関係があることを見いだした。それ以来、河川水、地下水、温泉、降水などを対象として、水素および酸素同位体比を使った研究が各地で行われてきた。日本列島全体(中国、韓国の一部を含む)での地表水、浅層地下水の水素、酸素同位体比の分布も Mizota and Kusakabe(1994)によって明らかになった。この研究には神奈川県内4地点の水素、酸素同位体比データが含まれている。Matsuo *et al.*(1985)は、箱根地域の降水、地下水および温泉を幅広く研究し、箱根の降水と温泉について、その水素同位体比と酸素同位体比には、それぞれ一定の関係があることを示した。さらに、既に知られていた Oki and Hiran(1970)による箱根温泉の成因モデルの成果を採り入れ、深部熱水と温泉との関連を明らかにしている。しかし、箱根温泉を除くと、神奈川県内の温泉や地下水の水素および酸素同位体比をとりまとめた報告はほとんどない。

この報告では、神奈川県の代表的な温泉について温泉水の水素および酸素同位体比(Dおよび¹⁸O)を調べ、特徴を明らかにすることとした。神奈川県の温泉は、箱根、湯河原の火山性温泉と丹沢周辺の温泉や横浜地域の非火山性温泉が比較的良く知られている。本研究では、Matsuo *et al.*(1985)の結果と比較するため、火山性温泉では箱根湯本温泉を対象に選ぶとともに、非火山性温泉については

丹沢東部の温泉、鶴巻温泉、中川温泉、津久井温泉を対象にして温泉水の水素および酸素同位体比の特徴を調べた。

2. 試料の採取地点と分析

試料は、主として温泉分析の際に採取したものを利用した。調査地域と分析に供した試料の採取地点は図1に示した。水素、酸素同位体比測定は、東京大学海洋研究所および三菱マテリアル中央研究所による委託分析に依っている。なお、同位体比は慣用の表記である値で示した。

$$(\%) = (R_x/R_s - 1) \times 1000$$

ここで、Rは同位体比、xは試料、sは標準平均海水(SMOW)である。R_xとR_sは、試料および標準平均海水の水素同位体比D/Hあるいは酸素同位体比¹⁸O/¹⁶Oであり、値はそれぞれDあるいは¹⁸Oと記される。

3. 結果

3.1. 温泉水の水素、酸素同位体比の分析結果

各温泉水の水素、酸素同位体比を表1および図2に示した。図2中に示した直線は箱根地域の降水線(Matsuo *et al.*, 1985)である。

図2では2つの特徴が見いだせる。その1つは、降水線に沿ってデータが集まっていることである。詳しく見ると、降水線に沿ったデータは、降水線に対して酸素同位体比¹⁸Oがプラス(+)側にずれているものが多いことがわかる。2つめは、降水線に対して斜めに交差するデータ群があることである。この交差するデータを明らかにするため、図2のうち、降水線に対して斜めに交差するデータ群である

*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
論文, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第32巻, 15, 2001.

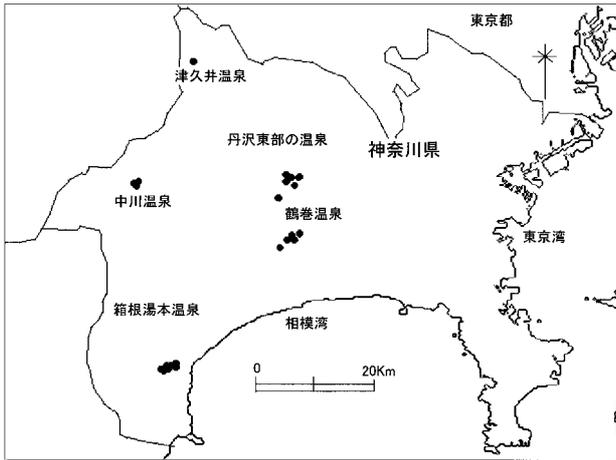


図1 調査地域と試料採取地点
Fig.1 Sampling sites in Kanagawa Prefecture

箱根湯本温泉と箱根湯本以外の温泉を分けて表示することとした。箱根湯本温泉は図3に示し、箱根湯本温泉以外の温泉を図4に示した。

3.2. 箱根湯本温泉の特徴

図3は箱根湯本温泉の水素、酸素同位体比である。図3中に示した直線の1つは箱根地域の降水線であり、もう1つは、Matsuo *et al.* (1985)による箱根温泉の水素と酸素同位体比の関係式

$$D = 2.1 \delta^{18}O - 33.5 \text{ (TWL; Thermal Water Line)}$$

である。箱根湯本温泉の水素、酸素同位体比データは、この式に沿って分布していることがわかる。本報告のデータは、箱根温泉の一部である箱根湯本温泉だけのデータはあるが、水素、酸素同位体比のデータはMatsuo *et al.* (1985)の結果と一致している。

3.3. 丹沢東部、鶴巻、中川、津久井温泉の特徴

図4は丹沢東部、鶴巻、中川、津久井温泉の水素、酸素同位体比である。また、図4中には、2つの降水線を記入した。そのうち1つは、箱根地域の降水線であり、もう1つは、県央地域の降水線(神奈川県環境部水質保全課, 1987)である。

図4から地域的な特徴がわかる。丹沢東部、中川、津久井温泉の水素、酸素同位体比データは、箱根地域の降水線と県央地域の降水線に挟まれ、かつ、それぞれの地域がまとまって分布している。一方、鶴巻温泉の水素、酸素同位体比データは、県央地域の降水線よりも酸素同位体比がプラス(+)側にずれている。この鶴巻温泉の特徴については、4.3. で検討する。

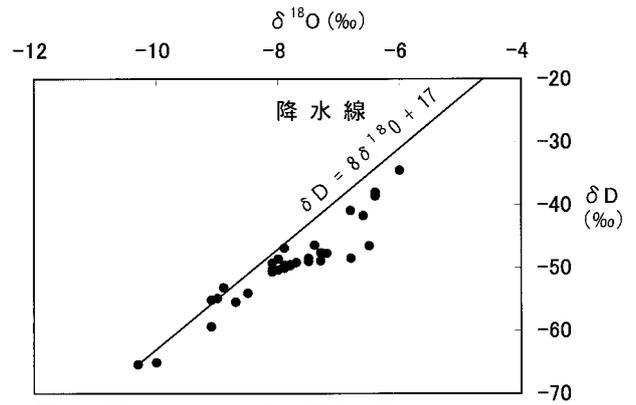


図2 温泉水の水素、酸素同位体比
Fig.2 D versus ^{18}O plot of typical hot spring waters in Kanagawa

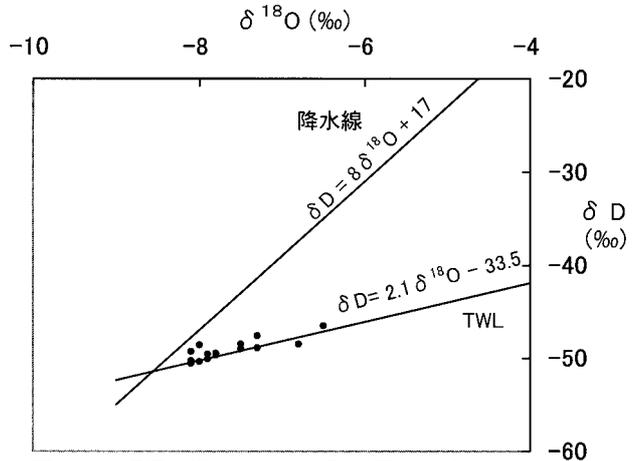


図3 箱根湯本温泉の水素、酸素同位体比
Fig.3 D versus ^{18}O plot of Hakone-Yumoto hot spring water

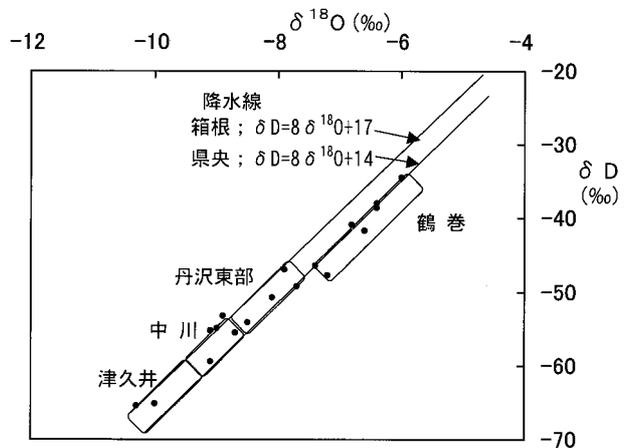


図4 丹沢東部、鶴巻、中川、津久井温泉の水素、酸素同位体比
Fig.4 D versus ^{18}O plot of Tanzawa water samples

表1 温泉水の水素、酸素安定同位体比

区分	No.	源泉番号	試料採取年月日	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)	測定 年	温 度 (°C)	塩化物 イオン (mg/l)	導電率 ($\mu S/cm$)
箱 根 湯 本 温 泉	1	湯本 12号	1990年 6月22日	-8.1	-50.6	1992	41.2	120	660
	2	湯本 12号	1985年10月18日	-8.1	-49.3	1987	43.1	132	662
	3	湯本 15号	1985年10月18日	-7.8	-49.5	1987	50.1	180	847
	4	湯本 15号	1990年 7月 4日	-8.0	-48.6	1992	45.1	182	875
	5	湯本 19号	1985年11月15日	-7.3	-48.9	1987	72.3	351	1273
	6	湯本 55号	1990年 6月18日	-7.8	-49.7	1992	57.7	222	1064
	7	湯本 55号	1986年 9月18日	-7.9	-50.1	1987	58.9	260	1135
	8	湯本 56号	1985年10月18日	-7.5	-48.5	1987	38.8	59	329
	9	湯本 56号	1990年 6月 7日	-7.3	-47.6	1992	37.4	74	392
	10	湯本 67号	1990年 6月26日	-7.9	-49.6	1992	46.3	109	527
	11	湯本 79号	1990年 6月18日	-8.1	-50.3	1992	41.0	16	206
	12	湯本 94号	1985年 7月26日	-6.8	-48.5	1987	61.6	849	*1966
	13	湯本101号	1985年11月15日	-7.5	-49.0	1987	75.2	721	1600
	14	湯本112号	1990年 6月22日	-6.5	-46.5	1992	79.8	1923	6450
	15	湯本116号	1990年 6月14日	-8.0	-50.4	1992	63.3	1314	4910
	16	湯本120号	1992年 1月22日	-7.3	-48.9	1992	63.4	1265	4340
中 川	17	足柄上2号	1994年 8月16日	-9.1	-59.4	1994	35.6	26	622
	18	足柄上5号	1986年 2月 9日	-9.0	-54.9	1990	25.0	8.9	307
	19	足柄上7号	1985年 9月13日	-9.2	-55.2	1990	30.3	12	451
津久井	20	津久井1号	1992年10月27日	-10.3	-65.4	1993	46.7	87	1369
	21	津久井1号	1992年 3月12日	-10.0	-65.1	1993	46.5	—	1296
丹 沢 東 部	22	厚木 5号	1989年 3月29日	-7.9	-46.9	1989	16.1	5.0	137
	23	厚木 6号	1989年 3月29日	-7.7	-49.2	1989	16.1	9.5	135
	24	厚木 1号	1990年 3月 2日	-8.9	-53.2	1990	19.2	77	*483
	25	厚木 13号	1992年 4月 9日	-8.7	-55.5	1993	27.7	45	448
	26	厚木 4号	1992年11月19日	-8.1	-50.7	1993	17.2	4.6	111
	27	秦野 20号	1992年10月 7日	-8.5	-54.1	1993	26.1	74	665
鶴 巻 温 泉	28	秦野 1号	1984年 7月 2日	-6.4	-38.6	1988	25.8	3726	*6946
	29	秦野 12号	1990年 9月 3日	-7.2	-47.7	1991	21.8	678	2240
	30	秦野 16号	1990年 9月 3日	-7.4	-46.4	1991	21.3	2550	7070
	31	秦野 17号	1984年 8月17日	-6.4	-38.0	1988	37.2	4491	*7915
	32	秦野17号外管	1990年 9月 3日	-6.8	-40.9	1991	34.8	3408	—
	33	秦野 17号	1976年 8月12日	-6.0	-34.5	1988	37.3	4560	*7321
	34	秦野 21号	1992年 9月11日	-6.6	-41.7	1993	35.8	1305	3770
県央		地下水	1984年~1985年	-8.2	-51.7	1986	—	9.7	—

備考1. *は、蒸発残留物 mg/l

備考2. 秦野 17号外管は、秦野 17号の外管の水(深度 148m)である。

備考3. 地下水は、県央地域の地下水(神奈川県環境部水質保全課, 1987)による。

備考4. 測定年が1986~1989までは東京大学海洋研究所、1990~1994については三菱マテリアル中央研究所で測定した。

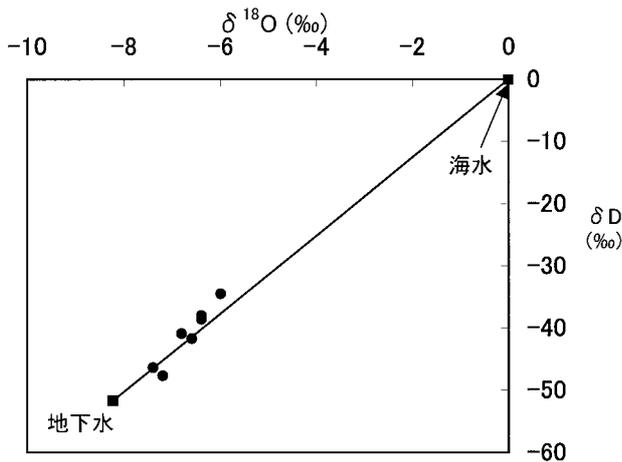


図5 鶴巻温泉の水素、酸素同位体比
Fig.5 D versus ^{18}O plot of Tsurumaki water samples

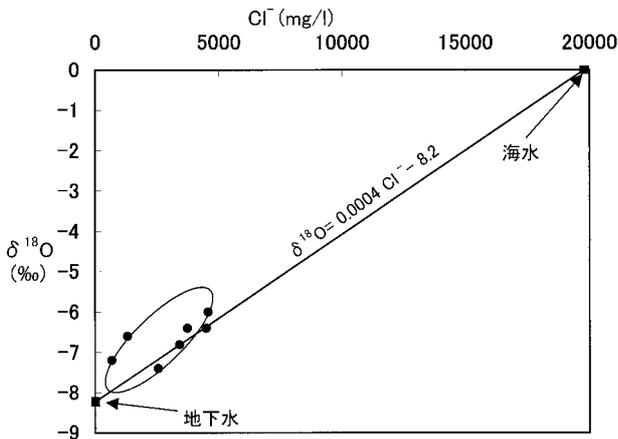


図6 鶴巻温泉の塩化物イオンと酸素同位体比
Fig.6 ^{18}O versus Cl^- plot of Tsurumaki water samples

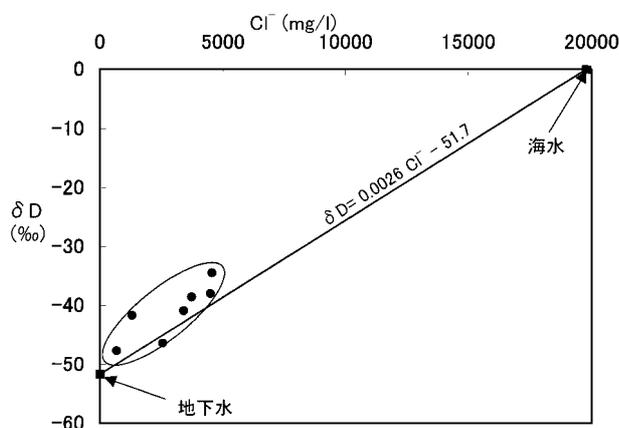


図7 鶴巻温泉の塩化物イオンと水素同位体比
Fig.7 D versus Cl^- plot of Tsurumaki water samples

4. 考察

4.1. 箱根湯本温泉

箱根湯本温泉の水素、酸素同位体比は、Matsuo *et al.* (1985)によって示された箱根温泉に共通な関係式 TWL で特徴づけられていることを確認した。Matsuo *et al.* (1985) は、火山性の深部熱水に降水起源の地下水が混入して箱根温泉が生成されていることを示した。本研究では、深部熱水や降水起源の地下水は調査していないので、深部熱水などについては論述できないが、この考え方に立てば、箱根温泉では、中央火口丘の温泉も箱根湯本温泉も共通の火山性深部熱水や降水起源の地下水があり、これらから温泉水が生成されていると言える。

4.2. 丹沢東部、中川、津久井温泉

丹沢東部、中川、津久井温泉の水素、酸素同位体比は、箱根地域の降水線と県央地域の降水線の間で挟まれて分布している。海岸に近い県央地域と内陸に相当する箱根地域の降水線の範囲にある。

また、丹沢東部、中川、津久井の水素、酸素同位体比は、それぞれの地域のデータが固まって分布し、丹沢東部、中川、津久井の順に数値が小さくなっている。一般的に、降水の水素、酸素同位体比が、内陸になるにしたがい、あるいは高度が高くなるにしたがい小さくなること(早稲田、中井、1983)が知られていることから、丹沢東部、中川、津久井の各温泉水の水素、酸素同位体比にも降水の地域差が反映されていると考えられる。

4.3. 鶴巻温泉の特異性

鶴巻温泉のデータは、水素、酸素同位体比の図4において、丹沢東部、中川、津久井とは明らかに異なった位置に分布している。分布傾向は、県央地域の降水線に沿っているが、水素、酸素同位体比の値が箱根と県央の降水線に挟まれた範囲の外に位置している。

鶴巻温泉は、火山性温泉と比べても塩化物イオン(Cl^-)が多く含まれている。化学成分などから、化石海水が関与した温泉である(大木ほか、1983)と言われている。鶴巻温泉に海水と地下水のデータを加え、水素と酸素同位体比を表したのが、図5である。海水の成分の代表として、塩化物イオンを用い、海水と鶴巻温泉の関係を表したのが、図6、図7である。海水の値は、現在の海水の値である塩化物イオン 19,800mg/l、水素、酸素同位体比とも 0‰を使った。また、地下水は、県央地域の代表値、塩化物イオン 5mg/l、水素、酸素同位体比各 - 51.7‰、- 8.2‰(表1参照)を用いた。図5、図6、図7とも、鶴巻温泉は海水の位置から地下水の位置までを直線で結んだ線(海水の希釈

線)上に位置する。また、塩化物イオン濃度が高くなるほど各同位体比が高くなる傾向が見られる。しかし、図6、図7を詳しく見ると海水の希釈線よりも鶴巻温泉の同位体比はプラス側にシフトしている。これは、海水が長い時間地層に閉じこめられ、同位体比がプラス側にシフトしたため(例えば、Drever, 1982)と推定される。鶴巻温泉は、このような作用を受けた化石海水が地下水で希釈されたと考えたと説明ができる。通常は、酸素同位体比だけがプラス側にシフトするが、水素同位体比がプラスにシフトする例は、松葉谷ほか(1983)に報告されている。

鶴巻温泉など丹沢周辺地域には丹沢層群の大沢凝灰岩層が分布し(Mikami, 1962)、この凝灰岩層は海底堆積物と考えられている。しかし、鶴巻温泉に匹敵する高濃度の塩化物イオンを含む温泉は、松田町にある寄温泉を除くと他の凝灰岩層の分布地域には存在せず、きわめて限られた地域に湧出する温泉である。したがって、大沢凝灰岩層の分布地域であることに加えて、他の要因が現在の鶴巻温泉の成因に関わっていることになる。今後、海水が関与していると思われる他の地域の温泉と比較検討して、化石海水の成因条件を明らかにすることが必要である。

5. 結論と今後の課題

火山性温泉の代表として、箱根湯本温泉、丹沢周辺の温泉として、丹沢東部の温泉、鶴巻温泉、中川温泉、津久井温泉について温泉水の水素、酸素同位体比の特徴を調べた結果、3つのグループに分けることができた。各グループの特徴は次のとおりである。

(1)箱根湯本温泉の水素、酸素同位体比は、火山性深部熱水が含まれ、Matsuo *et al.* (1985)によって示された箱根温泉に共通な関係式

$$D = 2.1 \text{ }^{18}\text{O} - 33.5$$

で特徴づけられた。

(2)丹沢周辺の丹沢東部、中川、津久井温泉の水素、酸素同位体比は、その地域の降水に関連づけられ、これらの温泉水が降水に由来していることを示していた。

(3)塩化物含量が多い、鶴巻温泉の水素、酸素同位体比は、化石海水の関与を示し、鶴巻温泉は、化石海水を地下水が希釈したものと考えられる。

今後は、各温泉における水素、酸素同位体比そのものの要因を検討することや、海水が関与していると思われる鶴巻温泉以外の温泉などについて比較検討していくことが課題である。

6. 謝辞

この研究を実施する上で、試料の選定や採取にあたった当所の研究員の方々、とりわけ平野富雄研究部長(当時)、大山正雄専門研究員および板寺一洋技師にお礼申し上げます。

なお、この論文では、当所の温泉保護対策調査(昭和62年度当時)から平成6年度までの温泉関連事業によって実施された分析値を使用した。また、この研究は、第53回日本温泉科学会に於いて「水素、酸素安定同位体比から推定する温泉の水の由来」として発表したもの(石坂ほか、2000)の一部を再構成してまとめたものである。

参考文献

- Craig, H.(1961) Isotopic variations in meteoric samples, *Science*, 133, 1702-3.
- Drever, J.I.(1982) *The Geochemistry of Natural Waters*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, p343.
- 石坂信之、板寺一洋、栗屋徹(2000) 水素、酸素安定同位体比から推定する温泉の水の由来, 第53回日本温泉科学会大会講演要旨集, p47.
- 神奈川県環境部水質保全課(1987) 地下水流動調査結果, p25.
- 松葉谷治、越中浩、小室昭一(1983) 秋田県の温泉の同位体地球化学的調査報告, 秋田大学鉱山学部地研報告, 48, 11-24.
- Matsuo S., Kusakabe, M., Niwano, M., Hirano, T. and Oki, Y. (1985) Origin of thermal waters from the Hakone geothermal system, Japan, *Geochem. J.*, 19, 27-44.
- Mikami, K(1962) Geological and petrographical studies on the Tanzawa Mountainland, *Sci., Rep. Yokohama National Univ., sec. , nos. 8/9*.
- Mizota, C. and Kusakabe, M.(1994) Spatial distribution of $D \text{ }^{18}\text{O}$ values of surface and shallow groundwaters from Japan, south Korea and east China, *Geochem. J.*, 28, 387-410.
- 大木靖衛、荻野喜作、平野富雄、小鷹滋郎、栗屋徹、杉山茂夫、大山正雄(1983) 神奈川県温泉誌, 温地研報告, 14(2), 23-24.
- Oki, Y. and Hirano, T.(1970) Geothermal system of Hakone volcano, *Geothermics Special issue 2*, 2, 1157-1166.
- 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.