比叡山地東麓一帯の降水・河川水および 地下水の水素・酸素の同位体比

小林正雄^{*1}・北岡豪一^{*2}・吉岡龍馬^{*3}・堀内公子^{*4}・笹井恵美^{*5}

Hydrogen and Oxygen Isotopic Ratios in Precipitation, River
and Groundwaters in the Eastern area of the Hiei mountains

Masao KOBAYASHI^{*1}・Kouichi KITAOKA^{*2}・Ryuma YOSHIOKA^{*3}
Kimiko HORIUCHI^{*4}・Emi SASAI^{*5}

Abstract

Hydrogen and oxygen isotopic ratios of precipitations, river waters and groundwaters were analyzed to obtain the fundamental data for studying the process of groundwater flowing into Lake Biwa. Monthly precipitations were collected from March 1994 to August 1995 and water samples of river and groundwaters were also taken in March and August 1995 in the eastern area of the Hiei mountains. The isotopic ratios of precipitations show seasonal variations having a saw-toothed shape with a minimum in July and a maximum in November. The weighted means of δD and $\delta^{18}O$ values for precipitation are -52.6% and -8.6% near the summit, and -50.4% , -7.7% at the low land. Altitude isotopic effect per 100m elevation is -0.4% for δD and -0.2% for $\delta^{18}O$. The meteoric water lines are expressed as $\delta D = 8 \delta^{18}O + 16$ near the summit and as $\delta D = 8 \delta^{18}O + 18$ at the low land.

Hydrogen and oxygen isotopic ratios in river and groundwater samples show no remarkable changes with time. Altitudinal effect for river and groundwater as well as that of precipitation having a slight difference between the mountain area ($-0.1\%/100m$ for $\delta^{18}O$) and the low land area ($-0.3\%/100m$).

Key wards : hydrogen and oxygen isotopic ratio, precipitation, river water,
groundwater, Hiei mountains

キーワード : 水素と酸素の同位体比, 降水, 河川水, 地下水, 比叡山地

I. はじめに

降水や河川水・地下水の水素と酸素の同位体比 (δD と $\delta^{18}O$) は, 水の循環系や起源を解明する上で有効な指標であり, これまで数多くの調査・研究例がある (たとえば, Craig, 1961; Dansg

aard, 1964; 早稲田・中井, 1983; Gat, 1989; 北岡ほか, 1993; 吉岡ほか, 1993; Mizota and Kusakabe, 1994など)。河川水と地下水の供給源である降水の水素と酸素の同位体比は, 緯度効果, 高度効果のほか内陸効果や気温・気団などの季節変化により変動する。

^{*1}: 大阪教育大学教育学部自然研究講座 (Division of Natural Science, Osaka Kyoiku University)

^{*2}: 京都大学理学部地球熱学研究施設 (Beppu Geothermal Research Laboratory, Faculty of Science, Kyoto University)

^{*3}: 富山県立大学短期大学部 (College of Technology, Toyama Prefectural University)

^{*4}: 大妻女子大学社会情報学部 (School of Social Information Study, Otsuma Women's University)

^{*5}: 大津市役所 (Otsu municipal office)

日本の降水の水素と酸素の同位体比は、全般に北陸・中部・東北などの降雪地域では冬季に高く、夏季に低い変化を示し、また、太平洋側地域では、梅雨期と台風期に低く、5月、8月、11月に高い変化を示し（IAEA, 1981）、地域により季節変化のパターンに違いがみられる。また、天水の同位体比の値は標高の増加に伴い100m当たり、水素は0.5～2‰、酸素は0.1～0.3‰低下する高度効果が認められている（早稲田・中井, 1983；水谷・小田, 1983）。しかし、内陸部に湖が分布する琵琶湖集水域の降水や地下水の水素と酸素の同位体比については、わずかに雪のデータが公表されている程度にすぎず（加藤私信）、その季節変化や高度効果については不明な点が多い。

筆者らは1994年から琵琶湖へ流入する地下水流動系の実態把握を目的として、比叡山地の東麓一帯で、地下水位の測定、環境同位体（ δD , $\delta^{18}O$, トリチウム, ラドン（ ^{222}Rn ））および水質を指標とした調査を行っている。前述したように、降水の水素と酸素の同位体比は、その地点の地理的条件や気象条件を反映している。したがって、安定同位体比を利用して地域的あるいは局地的な地下水流動系の実態を把握するためには、その地域の地下水の供給源である降水の水素と酸素の同位体比の特徴を明らかにしておく必要がある。

以上の観点から、その手初めとして比叡山東麓に位置する四ツ谷川流域を主な対象地域に選び、降水、河川水および地下水を採取し、各試水の水素と酸素の同位体比および水質の分析を行った。

本地域は扇端部が直接湖に接しており、また、地形勾配も湖岸部を除き急であり、早い水循環系をもつ地域と考えられる。

本報では、降水、河川水および浅層の地下水の水素と酸素の同位体比の季節変化、および高度変化を中心に検討したので、その概要を述べる。

II. 調査地域の気候および地質の概要

比叡山地は琵琶湖西岸の南部に位置している（Fig. 1）。本地域を含む琵琶湖集水域は、夏は瀬

Fig.1 Location map of study area showing the sampling sites of rain water, river water and groundwater.

戸内海側型気候区に入り、冬は大部分が日本海側型気候区に入り、一部太平洋側型気候区の性質を示す（関口, 1959）。降水量は1～2月に少なく、6月（梅雨期）と9月（台風期）に多い。また、年間降水量は1500～1600mmで山地部の降水量が低地部に比べやや多い。冬季には本地域以北の山地部（比良・比叡山地）には強い北西の季節風が吹き、高所では積雪する。

比叡山東麓一帯は大宮川以北の一部地域を除き、全般に花崗岩類である。扇状地を形成する低地部の地層は、上位から下位に向い、砂・レキ・シルト質砂から成る沖積層、洪積層となっている。山頂部付近は基盤岩が露出しているが、中腹部より山麓部の表層は風化が進行しており、いわゆるマサ土が露出している。また、四ツ谷川扇状地では扇頂部から扇央部にかけて水田・畑が広く分布するが、扇端部は住宅区域となっている。

Ⅲ. 調査方法

降水は比叡山地の山地部 (P1, 標高630m) と低地部 (P2, 標高88m) の2地点で、1994年3月から1995年8月まで、嶋田・三條 (1987) による採水装置を用い、毎月1回採取した (Fig. 1)。また、四ッ谷川流域では扇状地一帯を中心に、渇水期に相当する冬季 (3月) と夏季 (8月) に2回、河川水、湧水、自噴井戸の水、井戸の水を合計30地点で採取した。河川水・地下水は、降雨の直接の影響をさけるため、採水日以前に最低1週間は降雨がない日を選び試水を採取した。なお、本調査期間中の1994年は、梅雨期の降水量が例年の1/3程度と極めて少なく、また夏季には高温となり全国的に異常渇水となった年で、今回の結果にはその異常気象の影響が現れている可能性があるが、この点については検討していない。

水素と酸素の同位体分析用の試水は、気泡が残らないように全て水中でバイアル瓶 (WHEATON製) に詰め、分析機関 (Geological & Nuclear Sciences, New Zealand) へ送付し分析を依頼した。同位体比の値は標準海水 (SMOW) からの千分率偏差 (δ 値: ‰) で表し、 δD と $\delta^{18}O$ の値の測定精度は、それぞれ ± 1 ‰, ± 0.1 ‰である。水質は現地で電気伝導度 (Model SC51導電率計), pH (比色計) を測定し、実験室でpH (降水のみガラス電極pHメータ), HCO_3^- (pH4.3アルカリ度: 半谷・小倉, 1985), SiO_2 (モリブデン酸黄色法: 三宅・北野, 1976), Na^+ , K^+ (炎光光度法: 三宅・北野, 1976), Ca^{2+} , Mg^{2+} (原子吸光光度法: 日本分析化学会北海道支部, 1981), Cl^- , SO_4^{2-} (イオンクロマト法: 横河IC7000) を、それぞれ括弧内に示した測器および分析法により測定した。

Ⅳ. 結果および考察

1. 降水の水素と酸素の同位体比の季節変化

山地部 (P1) と低地部 (P2) の降水の水素と酸素の同位体比と降水量 (P1), および Cl^- 濃度と

Fig. 2 Monthly variation of precipitation, δD and $\delta^{18}O$ values in rain water collected around the Hiei mountains, Shiga Prefecture

d値 (P1) の結果をFig. 2とFig. 3に示す。

降水の δD と $\delta^{18}O$ の値は、2地点とも6月に最低値、11月に最高値を示し、全般に4月・5月、8月、11月に高く、他の月に低い鋸歯型の変化を示す。この δ 値の変化には、降水量が多い1994年の9~10月に δ 値が低く、降水量の少なかった1995年7~8月に高いような降水量との対応が窺える。このような対応 (雨量効果) は各地域でも認められている (Hartley, 1981; 早稲田・中井, 1983)。しかし、データ数は少ないが、梅雨期とはいえ、降水量が極めて少なかった1994年6月には最低値に近い δ 値を示し、また春季 (4・5月) と冬季 (1月) には降水量が他の月に比べ多いにもかかわらず全般に高い値を示す。これらは、本地域の降水の水素と酸素の同位体比の変化が降水量の多少により変化する効果に、後で述べる気団の分布の変化による影響が重なっているものと考えられる。

また、通常d値 ($d = \delta D - 8\delta^{18}O$) として表される値は春季~秋季に低く、冬季、特に降雪がみ

Fig. 3 Monthly variation of d-parameter and chloride concentrations in rain water collected around the Hiei mountains, Shiga Prefecture.

られる12月～2月に高い値を示す周期的変化を示す (Fig.3)。

Fig.4は2地点の水素と酸素の同位体比の全測定値を、 δD 値を縦軸に、 $\delta^{18}O$ 値を横軸にとりプロットしたものである。図中の黒の丸印と三角印は冬季(11月～3月)を、白の丸印と三角印は春季～秋季(4月～10月)を示す。図には参考のためにCraigによる天水線($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$)とMatsubaya *et al.* (1973)による、日本各地の河川水と地下水の水素と酸素の同位体比の測定値に基づく、日本の天水線($\delta D = 8\delta^{18}O + 17$)をそれぞれ実線と点線で示した。また、斜線で囲んだ部分は、本地域の河川水と地下水の水素と酸素の同位体比の分布範囲である。

図から明らかなように、本地域の降水の水素と酸素の同位体比は、春季～秋季にはほとんどの値がCraig (1961)の天水線付近に、また、冬季には日本の天水線より δD がやや高い側に分布している。

降水を山地部と低地部のものとに分けた1水年(1994年3月～1995年2月)の δD 値と $\delta^{18}O$ 値の間、および本地域(山地部と低地部)の降水の春季～秋季(4月～10月)と冬季(11月～3月)の δD と $\delta^{18}O$ の間には、いずれもつぎのような良好な直線関係が認められる。

ただし、nはサンプル数、rは相関係数である。また、下阪本の1995年4月の値は異常値と思われるため除外した。

Fig. 4 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ values in waters of rain, river and groundwater collected around the Hiei mountains and Yotsuya River fan.

山地部 $\delta D = 8\delta^{18}O + 16$ ($n=11$, $r=0.924$)

低地部 $\delta D = 8\delta^{18}O + 18$ ($n=11$, $r=0.905$)

春季～秋季 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ ($n=19$, $r=0.978$)

冬季 $\delta D = 7\delta^{18}O + 14$ ($n=12$, $r=0.973$)

本地域の降水のd値は、1水年についてみると低地部がやや高い。また季節的には係数に違いがみられるが、冬季が春季～秋季に比べ明らかに高い。

冬季にd値が高いことは、中部日本・東北日本・北陸でも観測されており、それは冬季に日本海側からの大陸性気団の、夏季に太平洋側からの気団(小笠原気団)の影響を受けるものとして知られている。すなわち、冬季の降水は日本海に水蒸気起源をもつ大陸性気団によりもたらされ、春季～秋季の降水は太平洋ないし東シナ海に水蒸気起源をもつ気団によりもたらされるためと解釈されている(酒井ほか, 1977; 佐竹ほか, 1984; 山本ほか, 1993)。本地域の降水の水素と酸素の同位体比と Cl^- 濃度の季節変化のパターンは、北陸地方の降水の $\delta^{18}O$ と Cl^- 濃度の季節変化のパターン(佐竹ほか, 1984)とよく類似している (Fig.3)。これは、本地域の降水がこれらの地域と同様に、季節により異なった水蒸気の起源をもつ気団の影

響を受けていることを示すものであり、本地域が冬は日本海側型気候区に入り、夏は太平洋側型気候区にはいるとされていることと矛盾しない。

2. 降水の水素と酸素の同位体比の高度効果

2地点の1994年3月から1995年2月までの降水量による水素と酸素の同位体比の年荷重平均値はつぎの通りである。

山地部 $\delta D = -52.6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -8.6\text{‰}$

低地部 $\delta D = -50.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -7.7\text{‰}$

こうして求めた δD と $\delta^{18}\text{O}$ の年荷重平均値は、山地部が低地部より δD で -2.2‰ 、 $\delta^{18}\text{O}$ で -0.9‰ だけ低い。水素は測定精度に近い値であるが、酸素は明らかに山地部で低く、この差は高度効果によるものと思われる。

この2地点の年荷重平均値を用いて本地域の降水の水素と酸素の同位体比の100m当たりの高度効果の大きさを求めると、 δD で -0.4‰ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 値で -0.19‰ である。月毎の降水の水素と酸素の同位体比から求めた年間の単純平均値は、 δD で $-1\text{‰}/100\text{m}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ で $-0.2\text{‰}/100\text{m}$ で、いずれも大きな違いはみられない。

日本の各地の降水の安定同位体比の高度効果の大きさは、100mにつき δD で -2‰ 程度、 $\delta^{18}\text{O}$ で $-0.2 \sim -0.3\text{‰}$ の範囲にあり(早稲田・中井, 1983)、本地域の値と δD はやや異なるが、 $\delta^{18}\text{O}$ は同程度である。本地域でみられたこのような降水の水素と酸素の同位体比の高度効果は、比叡山地東麓一帯の河川水や地下水の涵養源の推定や地下水の流動系を検討する上で有効と思われる。

3. 河川水・地下水の水素と酸素の同位体比

河川水・地下水の水素と酸素の同位体比は、降水に比べ変動は極めて小さく、ほとんどがCraig (1961)の天水線($d=10$)とMatsubaya *et al.* (1973)による天水線($d=17$)の間に挟まれる狭い範囲に分布している(Fig.4)。しかし、時期的な変動の大きさを詳細にみると(Table 1)、河

Table 1 Results of $\delta^{18}\text{O}$ values in spring waters, river waters and groundwaters collected in March and August, 1995.

	Station NO.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Difference (‰)
		March	August	
spring water	S 3	-7.99	-7.90	0.1 $\leq$
	S 5	-7.87	-7.87	0
	S 7	-7.84	-8.06	0.2 $\geq$
	S 9	-8.38	-8.48	0.1 $\leq$
	S10	-8.06	-8.46	0.4 $>$
	S12	-8.11	-8.47	0.4 $>$
	S13	-8.25	-8.65	0.4 $>$
	S14	-8.17	-8.46	0.3 $>$
flowing well water	F 1	-7.89	-8.29	0.4 $>$
	F 2	-7.68	-8.06	0.4 $>$
	F 5	-7.65	-8.23	0.6 $>$
	F 6	-8.02	-8.30	0.3 $>$
	F 7	-8.09	-8.47	0.4 $>$
well water	W 2	-7.37	-7.76	0.4 $>$
	W 3	-8.10	-8.27	0.2 $\geq$
river water	R 1	-8.43	-8.29	0.1 $\leq$
	R 2	-8.39	-8.37	0
	R 3	-8.02	-8.34	0.3 $>$
	R 4	-8.24	-8.54	0.3 $>$
	R 5	-8.27	-8.27	0

川水、地下水ともに、全般に3月における値が8月における値より $-0.2 \sim -0.4\text{‰}$ だけ高い。すなわち、河川水の3月と8月の $\delta^{18}\text{O}$ 差は、四ツ谷川(R1)、東南寺川(R2)および天神川(R5)は測定精度内にあり時期的変化がみられない。しかし、藤の木川(R3)と大宮川(R4)では3月が8月より -0.3‰ 高い。また、低地部の湧水・井戸水・自噴井戸の水は、F5地点(-0.6‰)を除けば河川水のR3・R4地点と同様な変化を示しており、全般に3月(冬季)の安定同位体比が8月(夏季)に比べ高い傾向がある。

通常、河川水は集中豪雨や暴風雨などの多雨時を除けば地下水により涵養されている。また、一般に地下水や河川水の水素と酸素の同位体比は年平均気温や異常気象がない場合、季節変化がほとんどなく、また他の水系との混合がない限り、その流域の降水の安定同位体比の降水量を考慮した年荷重平均値にほぼ等しくなる(水谷, 1986)。したがって、この地域でみられるような河川水・地下水の水素と酸素の同位体比の時期的変化については、長時間地下に滞留した水に、同位体比の低

Fig.5 Altitudinal distribution of $\delta^{18}\text{O}$ values in waters of rain, river and groundwater and that of the catchment area.

い水循環の早い水、例えば標高の高い上流から流動してきた岩盤裂か水、あるいは一般に δ 値が低い梅雨期の多量の降水の浸透水などの混入による影響が考えられる。しかし、変化の大きさは小さくその区別は判然としない。この点は、河川水・地下水の水素と酸素の同位体比の季節変化を調べる必要がある。

4. 河川水・地下水の水素と酸素の高度効果

ここでは、降水量の結果から水素と酸素の δ 値が平水年の値と考えられる3月(冬季)の結果に基づいて、河川水・地下水の水素と酸素の同位体比の高度効果について検討する。なお、四ツ谷川流域一帯の地質は前述したように(Ⅰ及びⅡ章)、花崗岩質岩石で構成されており、また地形も急傾斜しているので、本流域には隣接する他の流域からの水の混入は極めて少ないと思われる。

Fig.5は地下水と河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の値を採水地点の平均標高に対してプロットしたものである。図中の直線は2地点の降水の荷重平均値を結ぶ線、点線は河川水と地下水の $\delta^{18}\text{O}$ の値の高度による変化の傾向を表示した線である。また、大きい白丸印は $\delta^{18}\text{O}$ の測定精度($\pm 0.1\text{‰}$)の範囲を示す。

河川水と地下水の $\delta^{18}\text{O}$ の値は、全般に標高が高くなるに伴い明らかに低下している。しかし、 δ 値の変化を山頂部から低地部に向い詳細にみると、標高800~400m付近までは河川水・地下水とも降水の高度効果を示す直線上にはほぼ分布している。しかし、標高400~200mでは δ 値はほとんど変化していなく、降水の高度効果を示す直線より $\delta^{18}\text{O}$ の値が低い方向へシフトした分布を示す。そして、標高約200m以下の低地部では、再び標高の低下に伴い低地部の降水の年荷重平均値に漸近している。さらに、標高100m付近では、特に湖岸近傍の井戸水(W2)のように、地下水の流下とともに δ 値が直線的に増加する傾向が窺える。また、 $\delta^{18}\text{O}$ は、標高が400mより高い地域では100m当たり、約 -0.1‰ 、標高が約200mより低い地域では約 -0.3‰ 低下しており、 $\delta^{18}\text{O}$ の高度効果の程度が標高により若干異なっている。この低地部の値は中部日本・東北日本の広域的な地表水の $\delta^{18}\text{O}$ の高度効果の大きさ $0.25\text{‰}/100\text{m}$ (早稻田・中井, 1983)ともほぼ一致している。

このような、標高による高度効果の違いについては、つぎのように考えられる。ある標高における河川水・地下水(湧水)は、その付近の降雨浸

透水と上流から流動してくる地下水により涵養されているであろう。その流域に様な降水があり、表層（土壌層）からの水の蒸発も場所により違わないとすると、豪雨や強雨時を除けば地下水の流動系はほぼ定常的と考えられるので、降水の高度効果が河川水・地下水に反映されると思われる。だとすれば、河川水・地下水の水素と酸素の同位体比は採水点の標高における降水よりも低い δ 値が観測されてよいはずである。今回の結果は全般的にこの考えに近い分布を示す。しかし、詳細にみると標高200~400mでは δ 値が変化していない。この点については、ある標高の集水面積の違い、換言するとその標高による浸透量の違いが現れている可能性がある。

本流域の高度別の集水面積は山頂部を除くと、標高400~600mで最も大きく、標高200~400mで小さい（Fig. 5）。集水面積が大きいことは、当然その標高における地下浸透量が多いことを意味している。 δ 値に高度効果がみられない標高200~400mの面積は、その上流側（標高400~600m）の面積の約1/3と小さい。したがって、この標高付近の河川水には δ 値の低い上流側の地下水流出の影響が強く現れ、 δ 値が変化しなかったと考えられる。また、集水面積が大きい低地部の地下水の δ 値が低地部の降水の年荷重平均値に近い値を示すことは、扇状地の地下水が低地性降水から多く涵養されていることを示唆する。

なお、扇状地の最下流に位置する湖岸近傍の井戸水（W2）の δ 値が降水の年荷重平均値より大きい値を示したことについては、低地部には水田や畑が広く分布しており、山地部に比べ、灌漑期には水面から、非灌漑期には土壌面からの水の蒸発による影響があらわれているものと考えられる。

V. おわりに

湖西岸の比叡山地東麓一帯で、1994年3月から1995年8月まで、山地部と低地部で毎月1回降水を採取し、さらに、1995年3月と8月に河川水と地下水を採取し、それぞれの水の水素と酸素の同

位体比の季節変化と高度に伴う変化を調べた。その結果つぎのことが明らかになった。

1. 降水の水素と酸素の同位体比は、山地部、低地部とも6月に最低値を示し、11月に最高値が現れる鋸歯型の季節変化を示す。また、 d 値は冬季に高く、春季~秋季に低い周期的な季節変化を示す。 δD と $\delta^{18}O$ の同位体比は標高の高い地点が低い地点より常に低く高度効果が認められる。降水量による年荷重平均値は、それぞれ山地部で -52.6‰ 、 -8.6‰ 、低地部で -50.4‰ 、 -7.7‰ で、高度効果の大きさは100m当たり δD で約 -0.4‰ 、 $\delta^{18}O$ で -0.2‰ である。また、降水の水素と酸素の同位体比は山地部では $\delta D = 8\delta^{18}O + 16$ 、低地部では $\delta D = 8\delta^{18}O + 18$ の直線付近に分布する。
2. 河川水・地下水の水素と酸素の同位体比は、時期的変化が極めて小さく、 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ と $\delta D = 8\delta^{18}O + 17$ の間に挟まれる狭い範囲に分布し、降水の高度効果の影響を受けている。 $\delta^{18}O$ の高度効果の大きさは、山地部（ $-0.1\text{‰}/100\text{m}$ ）が低地部（ $-0.3\text{‰}/100\text{m}$ ）よりわずかに小さい傾向を示す。

今回調査した湖西の比叡山地東麓一帯は標高90m付近に湧水があり、また、低地部には被圧帯水層が存在している。このような水理地質構造は湖西岸の比良山地東麓一帯とよく似ている。また、湖西岸一帯は降雪量の多い湖北地域を除くと、本地域と気象特性もよく似ている（滋賀県，1986）。これらのことは、本地域で得られた主に降水の水素と酸素の同位体比が、湖西岸一帯の他の地域の地下水流動系を解明する上でも有効な指標になりうることを示している。

謝 辞

本研究は財団法人「日本生命財団」の1994年度研究助成金により行われた成果の一部であり、研究助成を賜った日本生命財団に謝意を表します。

文 献

- 北岡豪一・由佐悠紀・神山孝吉・大沢信二・Stewart, M. K.・日下部実 (1993): 水素と酸素の安定同位体比からみた別府温泉における地熱流体の移動過程, 地下水学会誌, 35-4, 287-305.
- 酒井 均・松葉谷治・木島宣明・上田 晃・堤真 (1977): 中国, 四国地方の河川水および地下水の水素ならびに酸素の同位体比の研究, 山陽放送学術文化財団レポート, No. 20, 46-51.
- 佐竹 洋・向井利明・水谷義彦 (1984): D, T, ^{18}O からみた北陸地方の降水と河川水の水文学的研究, 富山大学トリチウム科学センター研究報告, 3, 45-56.
- 滋賀県 (1986): 滋賀県琵琶湖研究所プロジェクト研究記録集, 4-62.
- 嶋田 純・三條和博 (1987): 降水中の安定同位体測定用採取装置について, 第1回日本水文科学会秋期大会予稿集, 30-31.
- 関口 武 (1959): 日本の気候区分, 東京教育大学地理学研究報告, 3, 65-78.
- 中井信之 (1986): 地下水研究への同位体の利用, 地学雑誌, 95-7, 15-22.
- 日本分析化学会北海道支部編 (1981): 水の分析 (第3版), 化学同人, 504p.
- 半谷高久・小倉紀雄 (1985): 水質調査法, 第2版, 丸善, 378p.
- 三宅泰雄・北野康 (1976): 新水質化学分析法, 地人書館, 265p.
- 水谷義彦・小田松尚 (1983): 安定同位体比による富山県庄川扇状地地下水のかん養源および流動状況の研究, 地球化学, 17, 1-9.
- 水谷義彦 (1986): 水文学に望まれる諸問題—安定同位体水文学—, ハイドロロジー, 16, 74-82.
- 山本雅弘・北村俊博・赤木誠司・古川孝文・日下部実 (1993): 岡山県下の天水の水素及び酸素同位体比, 地下水学会誌, 35-2, 107-112.
- 吉岡龍馬・北岡豪一・小泉尚嗣 (1993): 同位体組成から推定される地下水の流動系について—三島市およびその周辺地域を例にして—, 地下水学会誌, 35-4, 271-285.
- 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.
- Craig, H (1961b): Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, 133, 1702-1703.
- Dansgaard, W (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- Gat, J. R (1980): The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation. In: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1, The terrestrial Environment, A, edited by P. Fritz and J. Ch. Fontes, Elsevier, Amsterdam, 21-47.
- Hartley, P. E (1981): Deuterium/hydrogen ratios in Australian rainfall. *J. Hydrol.*, 50, 217-229.
- IAEA (1981): Statistical treatment of environmental isotopes data in precipitation. Technical Reports Series, 206, IAEA, Vienna.
- Mizota, C. and Kusakabe, M (1994): Spatial distribution of δD - $\delta^{18}\text{O}$ values of surface and shallow groundwaters from Japan, south Korea and east China, *Geochem. Jour*, 28, 387-410.
- Matsubaya, O., Sakai, H., Kusachi, I. and Satake, H. (1973): Hydrogen and Oxygen isotopic ratios and major element chemistry of Japanese thermal water system. *Geochem. Jour*, 7, 123-151.

(受付 1997年4月1日)

(受理 1997年7月4日)

この論文に対する「討論」を1998年2月28日まで受け付けます。