

埼玉県熊谷市の降水の酸素・水素安定同位体比の特徴

藪崎 志穂*

キーワード：降水、安定同位体、d-excess、熊谷市

1. はじめに

我が国では降水は地下水や湧水、河川水等の起源となることが多く、その酸素や水素の安定同位体を地下水涵養過程や地下水流動などを把握する場合に利用することが有効とされており、これまでに多くの研究で利用されてきている（たとえば、水谷・小田, 1983; 小林ほか, 1997; Yasuhara *et al.*, 1997）。しかしながら、降水の酸素・水素安定同位体比は気温や降水量、雨をもたらず水蒸気の起源など気象条件によって大きく変動するため、年や月、さらに細かくみればイベントごとに同位体比はかなりの違いが生じる。従って、地下水流動の把握などにおいてより信頼性のある解析をおこなうためには、対象とする地域の降水データを長期間観測することが望ましい。本稿では、熊谷市で採取した2007年4月から2009年12月までの約3年間分の降水の酸素・水素安定同位体比の特徴について示し、他の地域の降水の同位体比の特徴と比較した結果について報告する。

2. 降水の酸素・水素安定同位体比の特徴

降水の酸素・水素安定同位体比の時間的・空間的变化については、いくつかの特徴が認められる。この特徴には、1) 降水量が多いと同位体比が低くなる（軽い同位体比が多くなる）雨量効果（amount effect）、2) 気温が低いと同位体比が低くなる温度効果（temperature effect）、3) 高緯度地域ほど同位体比が低くなる緯度効果（latitude effect）、4) 内陸部ほど同位体比が低くなる内陸効果（continental effect）、5) 標高が高い地域ほど同位体比が低くなる高度効果（altitude effect）などがある（Clark and Fritz, 1997）。

これらの効果の要因の一つとして、降水の起源となる水蒸気が形成されるときに相変化に伴い同位体分別が生

じることが挙げられる。水が蒸発するときには軽い安定同位体を含む水分子が選択的に蒸発するため、重い安定同位体を含む水分子（ H^2HO や $H_2^{18}O$ ）は液相中に残留する。一方、水蒸気が凝結する場合には、重い安定同位体を含む水分子が先に凝結し、軽い安定同位体を含む水分子は気相に留まる。こうした相変化はレイリー過程に従っている（大手, 2008）。この過程に従うことにより、大気中の水蒸気塊から連続的に凝結が生じるような一つのイベント降水では、初期の降水ほど同位体比は高く（重い同位体比が多く）なり、次第に降水の同位体比は低く（軽い同位体比が多く）なる。従って、降水の同位体の雨量効果や高度効果が生じることとなる。

酸素や水素の安定同位体比と気温との関係について、Craig (1961) は寒冷地で同位体比が低くなることを示している。一般的に気温と緯度には負の相関が認められ、高緯度地域では同位体比が低くなることも認められている。また、Dansgaard (1964) は世界的規模での降水の ^{18}O やDの年加重平均値と気温との関係を示し、それらには正の相関があることを明らかにし、温度効果や緯度効果の存在を示唆している。

一方、内陸効果であるが、これは降水の起源が海洋の水蒸気と考えると、降水過程で初期の同位体比の高い降水は沿岸部に降り、水蒸気が陸面を輸送されながら内陸へゆくに従い同位体比の低い降水が降るという現象（レイリー過程）のもとに成り立っている。しかしながら、水蒸気の輸送距離が長い場合には、降水の起源が海洋だけでなく、湖面などから蒸発した水蒸気も含まれている場合があり、必ずしもこの法則が現実には成り立たない場合もある。

このような降水の安定同位体比の特徴を効果的に利用することにより、多くの地域で地表水や地下水の流動や涵養域の推定などがおこなわれている。本研究はその基礎となるデータの集積を目標に実施し、併せて熊谷地域

* 立正大学地球環境科学部

にみられる特徴について論ずるものである。

3. 研究方法

次に、降水の採取方法や分析方法について示す。2007年4月から、立正大学熊谷校舎（埼玉県熊谷市）の屋上において月降水を採取し、現在も継続している。降水採取に際しては、蒸発の影響を防ぐため、蒸発を防止する構造を備えた降水装置を用いている（写真1）。降水採取装置の受け口には直径12cmのロートを取り付けた。採取時にはEC、pHの計測と併せて採取量も計測し、計算によって月降水量を求めている。採取した降水サンプルは100mlのポリエチレン製の容器に入れて冷暗所にて保存し、一般水質および酸素・水素安定同位体分析をおこなった。酸素・水素安定同位体分析は、前処理装置を用いて水サンプル1mlと液化炭酸ガスあるいは水素ガスとそれぞれ同位体平衡にさせた後、立正大学地球環境科学部環境システム学科に設置されている安定同位体質量分析装置（DELTA plus, Thermo Fisher Scientific）により分析をおこなった。値は標準平均海水からの千分率偏差（ δ 値）として次式であらわしている。

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{STD}}} - 1 \right) \times 1000 (\text{‰}) \quad (1)$$

ここで、 R は ^{18}O あるいは D であり、 R は $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ あるいは D/H ($^2\text{H}/\text{H}$)を示している。sampleは測定するサンプル、STDは標準試料であり、酸素と水素の同位体の場合は標準平均海水（V-SMOW）である。測定精度は、 ^{18}O で $\pm 0.05\text{‰}$ 、 D で $\pm 0.5\text{‰}$ である。なお、降水量、気温の気象データは熊谷気象台で観測されたデータを利用した。



写真1 降水採取装置

4. 結果・考察

4.1 降水の安定同位体比と d-excess 値の月変化

降水採取装置の採取量から計算した降水量と熊谷気象台の降水量データを比較したところ、ほとんどの月で概ね1:1の直線上に乗っている（図1）。従って、本論文では採取量から計算により求めた値を降水量として用いている。

月降水量と月平均気温、ならびに採取した月降水の酸素安定同位体比（ ^{18}O ）・水素安定同位体比（ D ）、 d-excess （ $= \text{D} - 8 \times ^{18}\text{O}$ ）の2007年4月から2009年12月の変化について図2に示した。年降水量の平均は1,232mm、年平均気温の平均は15.5である。降水量は梅雨前線が発達する初夏と秋雨前線や台風の影響を受ける秋季に相対的に多く、冬季は少ない傾向があらわれている。月平均気温は夏季には30近くまで上がり、冬は0を下回することは少ない。また、観測した期間においては、降雪はほとんど確認されていない。

酸素安定同位体比（ ^{18}O ）と水素安定同位体比（ D ）の変化をみると、どちらも同じような変動を示しているが、季節的な変化は顕著には認められていない。 ^{18}O では-17.15～-5.47‰、 D では-121.5～-29.9‰と非常に大きな変動幅を示しているが、これは2007年10月の同位体比データが非常に低い値を示しているためであり、この月のデータを除くと、おおよそ ^{18}O では-10～-5‰、 D は-75～-30‰の変動幅となっている。場所にもよるが、湧水や地下水では同位体比は年間を通じてほぼ一定している場合が多く、河川水の場合

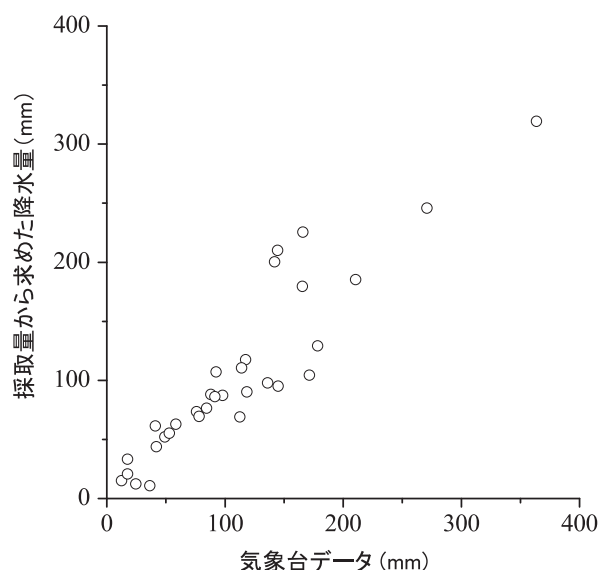


図1 降水採取量から求めた降水量と気象台の観測値との比較

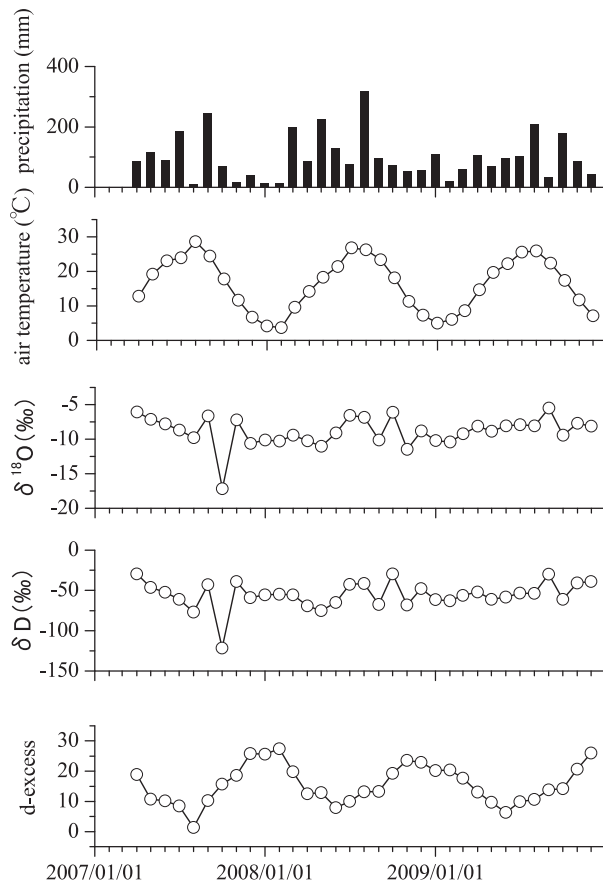


図2 熊谷市の月降水量、月平均気温、降水の ^{18}O 、D、d-excess値

でも ^{18}O は1‰以下、Dでも数‰程度しか変化しないことがほとんどであり(たとえば、水谷・佐竹, 1997; 藪崎, 2009)、こうした結果と比較しても降水の同位体比の変動は大きいということがいえる。

2007年10月の同位体比が他の月と比較して非常に低い値となっている原因として、台風の影響が考えられる。2007年10月26日~28日にかけて、台風20号(0720)が太平洋を北上しながら日本列島に接近し、熊谷の気象データによると26日では10mm、27日では76.5mmの降水量が観測された。短時間で非常に多くの降水が生じる台風の同位体比は相対的に低くなる傾向があることが観測されており(藪崎・田瀬, 2004)、熊谷の2007年10月の降水でも台風の影響によって同位体比が非常に低い値を示していると考えられる。

^{18}O およびDと降水量のデータをみると、明瞭な相関は認められない。一般的に降水量が多くなると ^{18}O やDは低くなる雨量効果が確認されているが、これはイベント降水(ひと雨ごとの降水)の測定をした場合に特に顕著に表れており(藪崎・田瀬, 2005)、月降水になると幾つかのイベント降水が混合するため雨量効果の影響は少なくなると考えられる。観測期間が約3

年と短いことも影響していると思われる。次に気温と ^{18}O ・Dのデータについてみると、こちらも特に相関は認められていない。気温が低いと ^{18}O やDは低くなる温度効果が観測される地域もあるが、それらは比較的高緯度地域で見られる現象であり(Clark and Fritz, 1997)、日本のような中緯度地域の降水の安定同位体の場合は、気温と降水量の双方の影響が混ざりあっているため、気温と同位体比にはあまり強い相関があらわれていないと考えられる。

d-excess値の場合は、夏季に低く冬季に高いという季節変化が明瞭に示されている。これは降水の源となっている水蒸気の起源と深く関係している。関東地方では、夏季には太平洋側の気団が、冬季には日本海側の気団による降水が卓越している。乾燥している条件下では蒸発の速度が速くなり、生じた水蒸気のd-excess値は相対的に高い値となる。一方、比較的湿潤な条件下では蒸発速度が緩やかであり、生じた水蒸気のd-excess値は相対的に低くなる。このメカニズムは早稲田・中井(1983)によって報告されている。こうしたことから、日本海側起源の水蒸気ではd-excess値が高くなり、太平洋側起源の水蒸気のd-excess値は低くなる。図2のd-excess値の結果から、熊谷の降水では夏季には太平洋側起源の水蒸気が卓越し、冬季には日本海側起源の水蒸気が卓越していることが示唆される。また、9月~10月と3月~4月ごろにd-excess値が急激に変化する傾向があるため、これらの時期に卓越する気団が変化すると考えられる。このような降水のd-excess値の明瞭な季節変化を利用することにより、地下水や河川水、土壌水などが主に涵養されている時期の推定をおこなうことも可能となる(水谷・佐竹, 1997; 藪崎・田瀬, 2007)。

2007年4月から2009年12月までの同位体データに降水量の重みづけをおこない加重平均値を求めたところ、 ^{18}O は-8.6‰、Dは-55‰となった。関東地方の周辺の値をみると(いずれも1992~2006年データ)、茨城県つくば市では ^{18}O は-7.9‰、Dは-51‰、埼玉県小川町では ^{18}O は-8.6‰、Dは-55‰、栃木県宇都宮市では ^{18}O は-8.2‰、Dは-54‰である(Yabusaki *et al.*, 2010)。つくば市や宇都宮市の値と比較すると熊谷市のほうがやや低い値となっているが、小川町とはほぼ同じ値を示している。気温や降水量なども考慮して考察をおこなった結果、これらの同位体分布は海岸からの距離(内陸効果)が影響していると考えられる。このように降水の同位体比の分布を示すことにより、

降水の起源である水蒸気の輸送過程などを把握することも可能であるが、水蒸気の起源などをより詳細に示すためには他の地点の同位体データや降水量、気温、標高、風向などとの関係など、さらに細かい観測を行う必要がある。

4. 2 降水の δD - ダイアグラム

降水の ^{18}O と D の値を用いて δD - ダイアグラムを示したところ、データはほぼ直線に沿うようにプロットされており、熊谷市の天水線 (回帰線) は $D=7.4$ $^{18}O+9.6$ ($r^2=0.868$) となった (図3)。世界の天水線の平均は $D=8$ $^{18}O+10$ となることが示されており (Craig, 1961)、熊谷市の降水もほぼ Craig の天水線と近い値を示していることがわかる。関東地方の周辺地域の降水の安定同位体データ (いずれも1992~2006年データ) をみると、茨城県つくば市では $D=7.5$ $^{18}O+10.4$ ($r^2=0.881$)、埼玉県小川町では $D=7.6$ $^{18}O+10.7$ ($r^2=0.923$)、栃木県宇都宮市では $D=7.4$ $^{18}O+8.9$ ($r^2=0.881$) となっている (Yabusaki *et al.*, 2010)。天水線の傾きや切片には若干の違いがあるものの、これらの地域の降水ではほぼ同じ天水線を示していることがわかる。また、夏季 (4月~9月) と冬季 (10月~3月) で同位体比を分けると、夏季のデータは相対的に天水線よりも下に、冬季のデータは天水線よりも上側にプロットされる傾向が顕著にあらわれている。これは、4.1で述べたように冬季の降水は日本海側の気団の影響を強く受け、夏季は太平洋側の気団の影響が強く受けていることに起因している。

図3には熊谷市内で採取した深層地下水のデータもブ

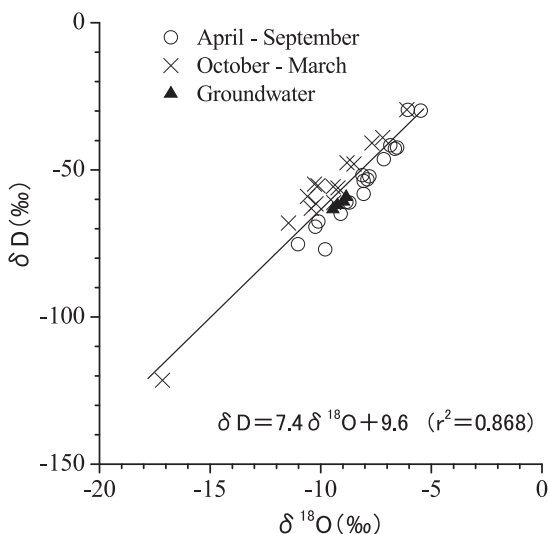


図3 降水の δD - ダイアグラム

ロットした。地下水サンプルの同位体比は4月~9月の夏季の降水の同位体比に近い位置にプロットされていることから、相対的に夏季の降水による涵養の割合が多いと推定できる。このように、 δD - ダイアグラム上に地下水や湧水、河川水などのデータをその地域の天水線と共にプロットすることにより、涵養時期の推定や他の水との混合の可能性、地下水流動系を把握することができる場合もあり、水循環を考える上で非常に有効的な方法の一つである。

5. まとめ

本稿では2007年から2009年まで熊谷市で採取した月降水の酸素・水素安定同位体比の特徴について示した。今回の結果では、降水の同位体比には気温や降水との相関は認められなかったが、 d -excess 値には明瞭な季節変化が認められた。この d -excess 値の季節変化を利用して、周辺の地下水などの涵養時期を推定することができると考えられる。また、台風による多量の降水が生じたときの同位体比は相対的に低い値となっており、土壌水の鉛直方向での挙動を考察する際に、こうしたときの値を指標として涵養時期や浸透速度などを推定することもできる。降水の同位体比は気象条件等によって異なるため年月によって大きく変化し、長期間の変動をみると、気温の上昇に伴い同位体比も変化する傾向が認められる。水循環や温暖化の影響などを把握するためにも、今後も調査・観測を継続してゆくことが重要であると考えられる。

謝辞

本論文の査読者の方には細部にわたり有益なご指摘を頂きました。また、本研究を進めるにあたり、平成20年度立正大学石橋湛山記念基金の助成を受けました。ここに記して御礼申し上げます。

引用文献

- Clark, I. and Fritz, P. (1997): Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, 328p.
- Craig, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- 小林正雄・北岡豪一・吉岡龍馬・堀内公子・笹井恵美 (1997) : 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. 日本水文科学会誌, 27, 143 - 150.

- 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・佐竹洋 (1997) : 地下水かん養源の指標としての河川水の水素および酸素同位体組成. 地下水学会誌, 39, 287 - 297.
- 大手信人 (2008) : 水の同位体比を利用した水循環の評価. 「流域環境評価と安定同位体」, 永田 俊・宮島利宏 (編), 京都大学学術出版会, 33 - 55.
- 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.
- 藪崎志穂・田瀬則雄 (2004) : 台風到来時の降水の酸素・水素安定同位体比の変動特性. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 5, 29 - 39.
- 藪崎志穂・田瀬則雄 (2005) : つくば市における降水の安定同位体比の特徴について. 水文・水資源学会誌, 18, 592 - 602.
- 藪崎志穂・田瀬則雄 (2007) : 土壌水の酸素・水素安定同位体比鉛直プロファイルの形成過程について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 8, 17 - 26.
- 藪崎志穂 (2009) : 松本市中心部の湧水および河川水の水質・同位体特性と地下水流動について. 日本地下水学会2009年春季講演会要旨, 42 - 47.
- Yabusaki, S., Tase, N. and Shimano, Y. (2010): Temporal variation of stable isotopes in precipitation at Tsukuba, Ogawa and Utsunomiya City in Japan. Groundwater response to changing climate. (IAH book No.16), CRC Press 55-66.
- Yasuhara, M., Marui, A. and Kazahaya, K. (1997): Stable isotopic composition of groundwater from Mt. Yatsugatake and Mt. Fuji, Japan. *IAHS publication*, 244, 335-344.

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation at Kumagaya City, Saitama Prefecture

YABUSAKI Shiho*

*Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

Keywords: precipitation, stable isotopes, d-excess, Kumagaya City