

中部山岳地域における降水の d-excess の時空間変動

脇山 義史** 牧野 裕紀****
山中 勤** 鈴木 啓助***

Spatiotemporal Variations in Deuterium Excess of Precipitation over the Japanese Alps Region

Yoshifumi WAKIYAMA**, Yuki MAKINO****,
Tsutomu YAMANAKA** and Keisuke SUZUKI***

[Received 10 October, 2012; Accepted 1 April, 2013]

Abstract

Deuterium excess (d-excess), as well as $\delta^{18}\text{O}$ and δD , can offer an opportunity to understand hydrological cycles. However, there have been few investigations on d-excess of precipitation within a broad area observation network, including high-latitude areas. This study presents spatiotemporal variations in d-excess of precipitation observed in the Japanese Alps region. Precipitation samples, collected monthly at 14 locations across the Japanese Alps region from July 2010 to June 2011, were sampled for isotopic analyses. Annual precipitation amount weighted mean values of d-excess ranged from 11.0 to 14.7%, and a correlation with altitude was found. No correlation with longitude and latitude was observed. Monthly variations in d-excess indicated a tendency toward higher d-excess values during the winter months at all sampling points. Spatial distribution of d-excess in each month showed significant correlations of d-excess with altitude in summer months. In winter months, relatively high values of d-excess were observed in precipitation caused under winter-type synoptic pressure patterns. Thus, spatiotemporal variations in d-excess of precipitation over the Japanese Alps region can be characterized by the correlation with altitude in summer months and the influence of synoptic conditions on its spatial distribution in winter months.

Key words : d-excess, precipitation, stable isotope of water, Japanese Alps region

キーワード : d-excess, 降水, 水の安定同位体, 中部山岳地域

* 筑波大学陸域環境研究センター

** 筑波大学大学院生命環境科学研究科

*** 信州大学山岳科学総合研究所

+ 現所属 : 筑波大学生命環境系

++ 現所属 : 神奈川県庁厚木水道営業所

* Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8577, Japan

** Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8572, Japan

*** Institute of Mountain Science, Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan

+ Present address: Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8577, Japan

++ Present address: Atsugi Waterworks Office, Kanagawa Prefectural Government, Atsugi, 243-0004, Japan

I. はじめに

水の安定同位体組成は、大気・水循環を解明するための有効なツールである (Dansgaard, 1964; Araguás-Araguás *et al.*, 2000; 檜山ほか, 2008; 芳村, 2009)。とくに降水の安定同位体組成は、大気中での輸送過程や凝結・蒸発といった相変化によって変化することが知られており、水循環に関連した研究で幅広く用いられてきた (Soulsby *et al.*, 2000; McGuire and McDonnell, 2006)。気候変動研究への応用において、降水安定同位体を気候情報などの代替情報として、古環境を推定・再現する試みが行われてきた (Rozanski *et al.*, 1992; 白岩・山口, 2002; Tian *et al.*, 2006)。近年では、水の安定同位体組成の空間分布に基づいて、広域の水循環を評価・診断する試みが行われている。例えば、Dutton *et al.* (2005) はアメリカ合衆国全域における降水と河川水の安定同位体組成の空間分布を調べ、両者の残差から流域特性の評価を行い、アメリカ合衆国の西部の河川では雪解け水の寄与が大きいことなどを示した。このように降水の安定同位体組成は大気循環のアウトプットとして、また陸域水循環のインプットとして、気候変動の影響解明のために利用価値が高い。

日本においてもさまざまな時空間スケールで降水安定同位体組成の観測が行われてきた。富士山 (安原・風早, 1995)、八ヶ岳 (風早・安原, 1994)、御嶽山東斜面 (中村ほか, 2002)、筑波山 (藪崎ほか, 2008) など単一の山体を対象とした研究が行われ、程度の差はあれ、いずれの地域においても降水安定同位体組成の標高依存性が示されてきた。一方で、広域を対象とした研究として、東北地方および中部地方を対象とした早稲田・中井 (1983) をはじめとして、関東平野における暖候期の降水イベントの水安定同位体組成の観測 (山中ほか, 2001)、降積雪の酸素・水素安定同位体に関する広域的な調査 (Watanabe *et al.*, 1986; 遠山ほか, 2005) が行われてきた。しかし、山岳部を含む広域的な観測網を用いて通年観測を行った例はない。

北・中央・南アルプスなど日本で有数の山脈が存在する中部山岳地域は、信濃川、木曾川、天竜

川などの一級河川の源流に位置し、重要な水源涵養域である。3000 m 級の山々は日本の屋根として機能し、豊かな水資源を供給する。とくに冬季に雪として蓄えられた水が春に融け出すことで、農業用水や生活用水として利用され、われわれの生活を支えている。気候変動により融雪に依存する水資源への負の影響が想定されるなかで、中部山岳地域における水循環を理解することは重要性を増していると考えられる。

中部山岳地域における水循環を理解する上で d-excess は有効なツールとなると考えられる。d-excess は、後述するように酸素・水素安定同位体組成 ($\delta^{18}\text{O}$, δD) の測定値から算出することができ、水の相変化における動的分別の程度の指標として用いられてきた。日本を含む東アジアでは降水の d-excess が夏季に低く、冬季に高いという時間変動を示すことが知られている (早稲田・中井, 1983; Araguás-Araguás *et al.*, 1998; 芳村・一柳, 2009)。海外では、この明瞭な季節性に着目し、地下水や河川水に対する雨季と乾季の降水の寄与率を推定した例がある (Lee *et al.*, 1999; Yeh *et al.*, 2011)。このような季節ごとの降水の寄与率を推定することは、中部山岳地域では有意義な情報基盤となると考えられる。こうした評価に活用するためには降水 d-excess の時空間変動特性を把握することが前提となるが、 $\delta^{18}\text{O}$, δD と同様に、日本において d-excess を広域で通年観測を行った例はきわめて少ない。

以上のような背景を踏まえて、中部山岳地域内の 14 地点において、2010 年 7 月から 2011 年 6 月までの 1 年間、降水安定同位体組成の観測を行った。本稿では、d-excess の性質や変動要因について簡単に説明したのちに、観測結果をもとに d-excess の時間変動の地域差、空間分布の時間変動を記述する。また、重要性が高いと考えられる冬季の d-excess の空間分布について考察するとともに、d-excess を用いた水循環の評価・診断に向けた予察を行った。

II. d-excess について

本章では、本稿で対象とする d-excess について、

その値の意味や変動要因について若干の説明を加える。d-excess を含めた水安定同位体に関するより精確な説明についてはこれまでに多くの優れた総説が発表されているので、それらを参照されたい (Araguás-Araguás *et al.*, 2000; Gat, 2000; Cappa *et al.*, 2003; 檜山ほか, 2008; 芳村, 2009)。

水の安定同位体組成 ($\delta^{18}\text{O}$, δD) は相変化にともなって変化する。蒸発の際には軽い (分子量の小さい) 水分子から気相に集まり、逆に凝結する際には重い (分子量の大きい) 水分子から液相または固相に集まる。こうした相変化に伴う分別は同位体分別と呼ばれており、平衡分別と動的分別に区別される。前者は水が二相間で平衡状態に達した状態における同位体分子と通常分子の交換であり、後者は急激な蒸発など一方的で非平衡の過程において生じる分別である。平衡・非平衡の同位体分別の強度は温度や湿度に依存するため、天然水 (降水・河川水・地下水など) の安定同位体組成はその地域の気象条件に左右される。全球スケールでは、その地域の気温・降水量などの気象条件や緯度・標高・海岸からの距離などの地理的条件と水の安定同位体組成が相関することが知られている (Dansgaard, 1964; Rozanski *et al.*, 1992)。

こうした同位体分別の過程を含めた水の安定同位体組成の変動を考察する一つの方策として、デルタダイアグラムおよび天水線が用いられてきた。デルタダイアグラムとは δD を縦軸に $\delta^{18}\text{O}$ を横軸にとり、同一サンプルの δD , $\delta^{18}\text{O}$ をプロットして作成する散布図であり、天水線とはデルタダイアグラム上での回帰直線である。Craig (1961) が全球スケールの観測結果から天然水 (降水・河川水・地下水など) の酸素と水素の安定同位体比の間には $\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ で近似される関係があることを見いだして以来、安定同位体組成の変動および水循環プロセスを解釈する方法として用いられている。この天水線の傾き 8 と切片 10‰ は測定結果から経験的に発見された関係式であるが、理論的に説明が可能である。芳村 (2009) は、飽和状態にある水蒸気が温度低下とともに平衡分別によって凝結水がとり除かれる状況を想定した思考実験において、 30°C から -10°C の範囲では天水

線の傾きがほぼ 8 となること、Craig and Gordon (1965) のモデルに適当な海水と水蒸気の global 平均 δ 値や海面上の気温・相対湿度を与えて計算することで切片が約 10‰ になることを紹介している。

Dansgaard (1964) は、この天水線の傾き 8 を用いて、 δD の切片を表す値 ($\delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$) を d-excess (原文では deuterium excess) と呼んだ。d-excess は天水線からのずれを表しており、天水線の切片はおもに動的分別の程度によって左右されるため、d-excess は動的分別の指標として用いられる。水蒸気の発生から降水までの過程を考えると、まず海面上などで蒸発 (動的分別) によって水蒸気が発生し、 $\delta^{18}\text{O}$, δD , d-excess の初期値が決定される。降水過程では凝結 (平衡分別) によって、水蒸気塊から順次重い (δ 値が高い) 水分子から除かれるため、降水の $\delta^{18}\text{O}$ および δD は輸送経路上の気象条件や降水履歴によって変化する。一方、d-excess はほぼ一定の値となる。このような d-excess の特性を活用して、海面における蒸発時の状況の推定 (Kondoh and Shimada, 1997; Yamanaka *et al.*, 2001) や降雨イベント中の雨滴からの蒸発 (Gedzelman and Arnold, 1994)、あるいは水蒸気の再循環をふくめた降水プロセスの推定 (Fudeyasu *et al.*, 2008; Lai and Ehleringer, 2011) が行われている。さらに古気温の復元 (Jouzel *et al.*, 1982; Johnsen *et al.*, 1989) にも活用されている。このように、d-excess の変動を記述することは、 $\delta^{18}\text{O}$, δD の変動の記述と同様に、水循環プロセスを知るために有効な手段となる。

III. 調査方法

降水のサンプリングは、中部山岳地域内の 14 地点 (甲府 [Kofu], 長野 [Nagano], 穴山 [Anayama], 松本 [Matsumoto], 諏訪 [Suwa], 大町 [Omachi], 西駒 [Nishikoma], 菅平① [Sugadaira1], 菅平② [Sugadaira2], 野辺山 [Nobeyama], 乗鞍 [Norikura], 上高地 [Kamikochi], 志賀高原 [Shigakogen], 西穂高 [Nishihodaka]) において行った (図 1)。表 1 にサンプリング地点の地点情報および解析に使用したアメダス (Auto-

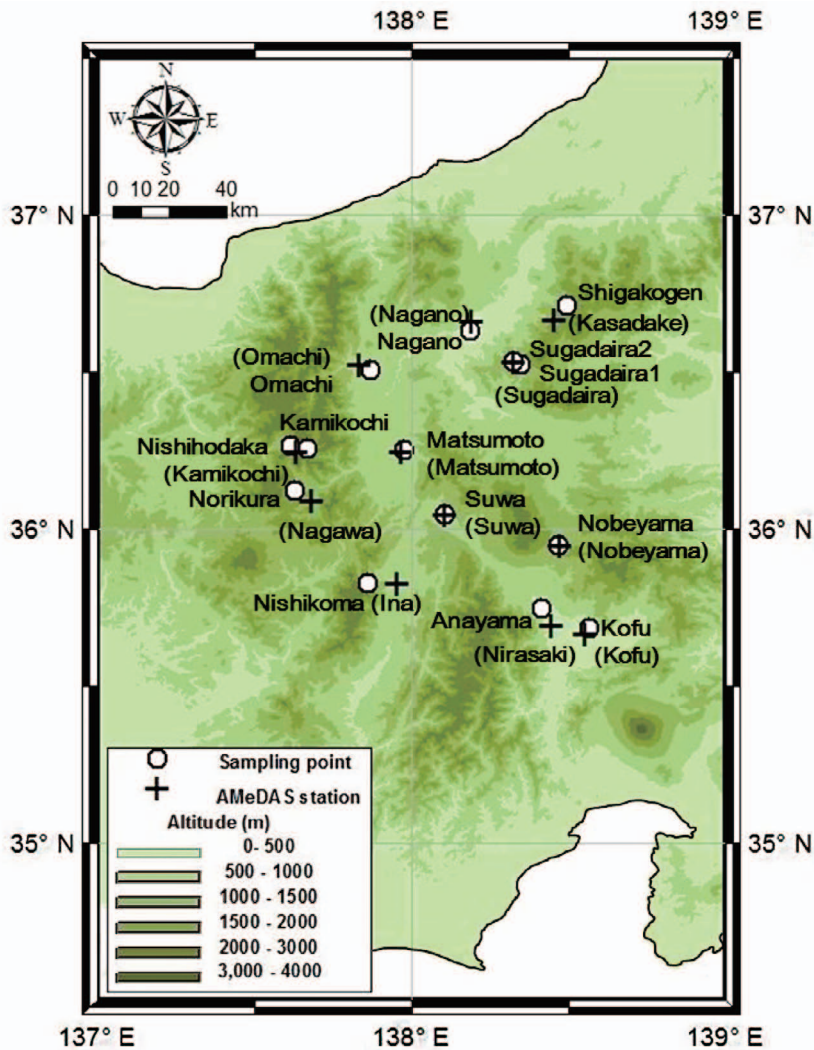


図 1 サンプルング地点とアメダス局の位置図。丸と十字はそれぞれサンプルング地点とアメダス局を示す。アメダス局名は括弧内に示されている。

Fig. 1 Map of sampling points and AMeDAS stations. Circles and crosses represent sampling points and AMeDAS stations, respectively. Names of AMeDAS stations are written in parentheses.

mated Meteorological Data Acquisition System: AMeDAS) 局を示す。アメダス局では各サンプルング地点における気温・降水量のデータを取得した。気温について、日平均気温を算術平均して求めた月平均値を、サンプルング地点とアメダス局との標高差(表 1)に気温遞減率 $-0.55^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ を乗じることで補正を行った。降水量について、年間を通じてボトルに捕捉された降水の量(採水量)を記録した穴山, 甲府, 菅平①, 野辺山では、いずれもアメダス局から取得した降水量と有意な正の相関($p < 0.05$)が認められたので、他の地

点でも月ごとの変動はほぼ同一であると判断し、14 地点すべてにおいて d-excess の降水による加重平均値を求める際にはアメダス局による降水量を用いた。各観測地点の北緯・東経・標高の間にはいずれも有意な相関は認められなかったが、東経と標高の間の相関係数は 0.44 であり、若干、西高東低の配置となっていた。日本海からの距離については、早稲田・中井(1983)は、冬季にはおもに日本海側から高い d-excess をもった水蒸気もたらされると述べており、この仮説の検証のため、地図上で観測地点から日本海岸までの最短距

表 1 サンプリング地点およびアメダス局の位置情報.

Table 1 Location information on sampling points and AMeDAS stations.

Sampling point	North latitude (degrees)	East longitude (degrees)	Altitude (m)	Distance from Japan Sea (km)	AMeDAS Station	Distance from AMeDAS station (km)	Difference of Altitude ^{*1} (m)
Kofu	35.68	138.57	304	163.8	Kofu	2.1	31
Nagano	36.63	138.19	354	53.3	Nagano	3.5	-64
Anayama	35.75	138.42	526	152.4	Nirasaki	6.8	185
Matsumoto	36.25	137.98	620	81.3	Matsumoto	1.1	10
Suwa	36.05	138.11	760	105.9	Suwa	0.5	0
Omachi	36.51	137.87	776	56.7	Omachi	3.6	-8
Nishikoma	35.83	137.86	1247	114.3	Ina	8.6	619
Sugadaira 1	36.53	138.33	1249	71.4	Sugadaira	0.5	-4
Sugadaira 2	36.52	138.35	1322	73.4	Sugadaira	2.6	69
Nobeyama	35.95	138.47	1350	134.0	Nobeyama	0.2	0
Norikura	36.12	137.63	1446	75.8	Nagawa	5.9	378
Kamikochi	36.25	137.67	1529	63.2	Kamikochi	3.3	19
Shigakogen	36.71	138.49	1594	56.7	Kasadake	5.7	104
Nishihodaka	36.27	137.62	2354	60.8	Kamikochi	2.9	844

*1: Difference of altitude between the sampling point and the AMeDAS station. Positive values indicate the higher altitude of sampling points than AMeDAS stations.

離を計測して求めた。

各地点において降水サンプラーを設置し、2010年7月から2011年6月まで1カ月間隔でボトルに捕捉された降水サンプルの回収を行った。降水サンプラーは、10 L ポリタンクに降水捕集のためのロートをとり付けて作成した。5月から10月の間はロートにピンポン球で栓をし、降雨による湛水が起こった時のみ、ポリボトルへ通水されるようにし、蒸発を防止した。降雪が予想される11月から4月の間は、ロート部分に水道凍結防止帯をとり付け、通電・加温し、サンプラーヘッドへの積雪を防止した。回収の際には6 ml ガラスバイアルに採水し、実験室へもち帰った。

実験室において、0.45 μm メンブランフィルターでろ過を行った後、レーザー分光式同位体分析計 (Picarro, L1102-ib) を用いて分析を行った。この同位体分析計の測定原理および測定方法は

山中・恩田 (2011) に記述されている。本稿に記載されるデータの測定誤差は $\delta^{18}\text{O}$ で 0.15% 以下、 δD で 1.0% 以下であった。IAEA 標準試料である SMOW (Standard Mean Ocean Water) GISP (Greenland Ice Sheet Precipitation), SLAP2 (Standard Light Antarctic Precipitation 2) の測定を行い、各測定値の補正を行った。各サンプルの $\delta^{18}\text{O}$ および δD はそれぞれ (1), (2) 式であらわされる。

$$\delta^{18}\text{O} = \left\{ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right\} \times 10^3 \quad (1)$$

$$\delta\text{D} = \left\{ \frac{(\text{D}/\text{H})_{\text{Sample}}}{(\text{D}/\text{H})_{\text{SMOW}}} - 1 \right\} \times 10^3 \quad (2)$$

ここで、 $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Sample}}$ および $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}$

表 2 $\delta^{18}\text{O}$, δD および d-excess の年平均値.

Table 2 Annual precipitation amount weighted mean values of $\delta^{18}\text{O}$, δD and d-excess.

Sampling point	Number of samples	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	d-excess (‰)	Data quality
Kofu ^{*1}	11	-10.78	-73.96	12.3	No precipitation in Jan.
Nagano ^{*1}	12	-10.73	-74.30	11.5	
Anayama ^{*1}	11	-11.16	-76.32	13.1	No precipitation in Jan.
Matsumoto	31	-11.72	-81.32	11.8	No precipitation in Jan., No data on Apr.
Suwa ^{*1}	11	-11.41	-79.60	11.6	No precipitation in Jan.
Omachi	10	-12.14	-84.77	12.1	No data in Apr.
Nishikoma	10	-12.17	-85.04	12.4	No data in Oct.
Sugadaira 1 ^{*1}	12	-11.91	-82.14	13.1	
Sugadaira 2 ^{*1}	12	-12.33	-84.69	14.0	
Nobeyama ^{*1}	12	-12.66	-87.09	13.8	
Norikura	11	-12.75	-89.90	11.9	No data in Oct. and Dec.
Kamikochi	11	-12.76	-90.24	11.0	No data in Dec. and Mar.
Shigakogen	12	-12.84	-88.96	14.1	No data in Jun. and Jan.
Nishihodaka	3	-14.2	-98.84	14.7	Data available in Jul., Aug. and Sep.

*1: No missing data.

はそれぞれ、サンプルと標準平均海水 (SMOW) の同位体比であり、 $\delta^{18}\text{O}$, δD は SMOW の値を 0‰ としたときの試料の $\delta^{18}\text{O}$ および δD である。得られた $\delta^{18}\text{O}$ および δD を用いて、下記の (3) 式により d-excess を算出した。

$$\text{d-excess (‰)} = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O} \quad (3)$$

ここで、 $\delta^{18}\text{O}$, δD はそれぞれ (1), (2) 式によって得られた値である。なお、本稿では、とくに d-excess の変動特性に焦点を当て、 $\delta^{18}\text{O}$, δD の変動特性の詳細については、別稿にまとめることとする。

IV. 結 果

1) 年平均値

表 2 に各地点における $\delta^{18}\text{O}$, δD , d-excess の年平均値を示す。年平均値は表 1 に示した直近のアメダス局の降水量により重みづけをして、加重平均値として求めた。なお、西穂高についてはサンプル数が少ないため、以下の年平均値の議論には含めていない。 $\delta^{18}\text{O}$ の年平均値は -10.73 ~ -12.84‰ の範囲にあり、その算術平均値は -11.95‰ であ

た。 δD の年平均値は、-73.96 ~ -90.24‰ の範囲にあり、その算術平均値は -82.95‰ であった。d-excess の年平均値は 11.0 ~ 14.7‰ の範囲にあり、その平均値は 12.7‰ であった。このうち西駒、乗鞍についてはサンプリング地点と対応するアメダス局との間に数 100 m を超える標高差があり (表 1)、降水量が一致しない可能性がある。一方で、甲府、長野、穴山、諏訪、菅平①、菅平②、野辺山の 7 地点では、観測期間を通じて欠測がなく、アメダス局との距離・標高差も比較的小さいため、年平均値は妥当な値であると判断した。

欠測がなかった 7 地点における $\delta^{18}\text{O}$, δD , d-excess の年平均値の平均はそれぞれ -11.6‰, -79.7‰, 12.9‰ であった。また、これらの 7 地点における $\delta^{18}\text{O}$ 年平均値と北緯・東経・標高、日本海からの距離との相関係数は、-0.19, -0.13, 0.97, 0.13 であった。同じく d-excess 年平均値と北緯、東経、標高、日本海からの距離との相関係数はそれぞれ -0.01, 0.54, 0.75, 0.12 であった。d-excess 年平均値は、 $\delta^{18}\text{O}$ および δD 年平均値と正負は逆であるものの、標高依存性がある点で共通している。

上述のように d-excess 年平均値と標高の間には有意な正の相関が認められた。 $\delta^{18}\text{O}$ および δD については標高との間に負の相関があることは、既往研究においてすでによく言及されている。しかし、d-excess の標高依存性があることを示した例はほとんどない。そこで、d-excess の標高依存性について検証するため、本研究の 7 地点の d-excess 年平均値を、御嶽山南東斜面（中村ほか、2002）、筑波山（藪崎ほか、2008）、富士山（安原・風早、1995）における d-excess 年平均値を含めて、標高との関係を調べた（図 2）。本研究と同様に御嶽山南東斜面、筑波山では標高との間に有意な相関が認められた。富士山において標高依存性が認められなかった理由については不明であるが、d-excess 年平均値の標高依存性は一般的に認められる傾向であるといえる。標高との関係を加味して既往研究の値と比べると、本研究における d-excess の年平均値は同等の値であるといえる。また、直線回帰式の傾きは、無相関の富士山を除いて 0.16 ~ 0.32‰/100 m であり、中部山岳地域全体としては比較的低い値であるといえる。

2) 月平均値の時間変動

図 3 に降水量、日平均気温、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD および d-excess の月平均値の推移を示す。降水量および日平均気温の月平均値は、それぞれ各アメダス局における降水量の月積算値と日平均気温の平均値を月ごとに算術平均して求めた。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD および d-excess の月平均値は各サンプリング地点の観測値を月ごとに算術平均して求めた。降水量については、サンプリング地点とアメダス局の降水量の違いが補正できないため、絶対的な評価は難しいが、平均的に暖候期に多く、寒候期に少ない傾向が認められた。日平均気温の年平均値は 9.6℃であり、平均値より高い暖候期（5 ~ 10 月）で 18.1℃、平均値より低い寒候期（11 ~ 4 月）で 1.2℃であった。 $\delta^{18}\text{O}$ の月平均値は、2010 年 11 月に最小値を示し、2011 年 4 月に最大値を示した。また、寒候期で変動が大きく、暖候期の平均値（-11.6‰）と寒候期の平均値（-12.0‰）には有意な差は認められなかった。 δD の月平均値も $\delta^{18}\text{O}$ と同様の変動パターンを示し、暖候期の

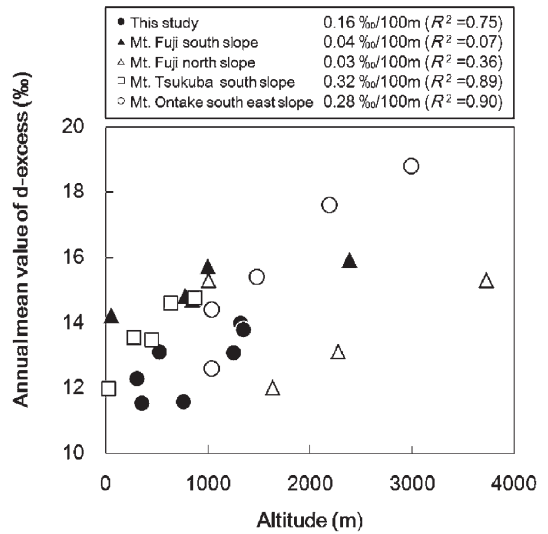


図 2 本研究および既往研究における d-excess 年平均値と標高の関係。年平均値は降水による加重平均値である。本研究の値は欠測のみられなかった 7 地点における年平均値である。既往研究での値として、富士山については安原・風早 (1995)、筑波山については藪崎ほか (2008)、御嶽山については中村ほか (2002) によって示される $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 降水加重年平均値を (3) 式に代入して算出した。凡例に地点名とともに併記した数字は、各地点における回帰直線の傾き (高度効果) と決定係数 (R^2) を示している。

Fig. 2 Relationship between altitude and annual mean values of d-excess, compiled from this study and previous studies. Annual mean values of d-excess are annual precipitation weighted mean values of d-excess. Those data in this study are derived from seven sampling points with no missing data. Those of Mt. Fuji, Mt. Tsukuba, and Mt. Ontake were calculated by substituting the values of $\delta^{18}\text{O}$, δD cited in Yasuhara and Kazahaya (1995), Yabusaki *et al.* (2008) and Nakamura *et al.* (2002), respectively, into equation (3). Numbers alongside each site name in the graph legends represent the slope (altitude effect) and determination coefficient (R^2) of the regression lines obtained in each site.

平均値 (-81.6‰) と寒候期の平均値 (-81.1‰) には有意な差は認められなかった。d-excess の月平均値は暖候期に低く、寒候期にかけて高くなる傾向がみられ、2011 年 6 月に最小値 ($9.0 \pm 2.3\%$, $n = 12$)、2011 年 1 月に最大値 ($19.8 \pm 3.6\%$, $n =$

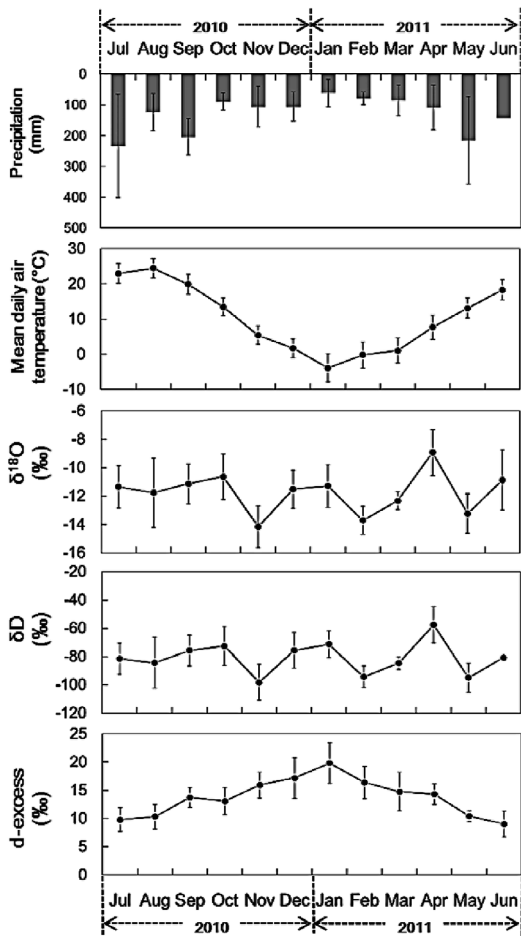


図 3 降水量、気温、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD および d-excess の月平均値の変動。降水量および気温の月平均値は、各アメダス局における降水量の月積算値と日平均気温の平均値を算術平均して求めた。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD および d-excess の月平均値は、各サンプリング地点の観測値を月ごとに算術平均して求めた。エラーバーは各月における全地点の月平均値の標準偏差 ($\pm\sigma$) を示している。

Fig. 3 Variations in monthly mean values of precipitation amount, air temperature, $\delta^{18}\text{O}$, δD , and d-excess. Values of precipitation amount and air temperature are arithmetic mean values calculated by averaging cumulative precipitation amount and daily mean air temperature recorded at AMeDAS stations monthly, respectively. Values of $\delta^{18}\text{O}$, δD , and d-excess are arithmetic mean values calculated by averaging data at all sampling points within a month. Error bars represent the standard deviation ($\pm\sigma$) of monthly mean values at all sampling points in each month.

8) がみられ、d-excess の時間変動は気温の時間変動と類似している。図示はしないが、各地点における d-excess と気温との相関係数は $-0.89 \sim -0.60$ であり、いずれの地点においても有意な負の相関が認められた。以上のように、中部山岳地域では $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD には明瞭な季節性がみられないのに対して、d-excess では冬季に高く、夏季に低くなる傾向が明瞭に認められる。

3) d-excess の時間変動の地域性と空間分布の時間変化

d-excess の変動パターンの地域的な特徴を把握するため、クラスター分析を行った (図 4)。I (甲府・穴山・松本) では、夏季の d-excess が低く、11、12 月に d-excess が高くなる。II (菅平①・長野・大町) では、1 月に急に高い値がみられることで共通している。III (菅平②・野辺山) では、夏季から冬季にかけて緩やかな増加傾向がみられる。IV (諏訪・西駒・乗鞍) では、年間を通じて変動幅が小さいことが共通しており、d-excess のピークが不明瞭かまたは 11 月にある。I, II, III の 3 つと IV の地域界は明瞭ではないが、大まかに南西に位置する IV の 3 地点とそれ以外の地点に分類される結果となった。

図 5 に月ごとの d-excess の空間分布および標高と d-excess の散布図を示す。この図では、図 3 の日平均気温の月平均値の変動に基づいて、暖候期 (5 ~ 10 月) と寒候期 (11 ~ 4 月) としてまとめ、それぞれ上段、下段に分けて示した。暖候期には全体的に低い値を示すが、甲府・松本ではとくに低い値がみられた。寒候期には全体的に高い値がみられ、北で比較的高い値が得られる月が多く、北緯との相関係数も暖候期に比べて高い傾向にある。標高と d-excess の散布図にみられるように、d-excess の値は 6 月から 11 月および 4、5 月には d-excess の範囲は 5% 程度に収まる。一方で、12 月から 3 月にかけて 10% 程度の範囲に収まり、寒候期に変動幅が大きくなる傾向がみられる。北緯・東経・標高と d-excess との相関をそれぞれみると、北緯との間には 9 月に負の相関、3 月に正の相関がみられた。東経との間には 8 月に負の相関、9 月と 3 月に正の相関がみら

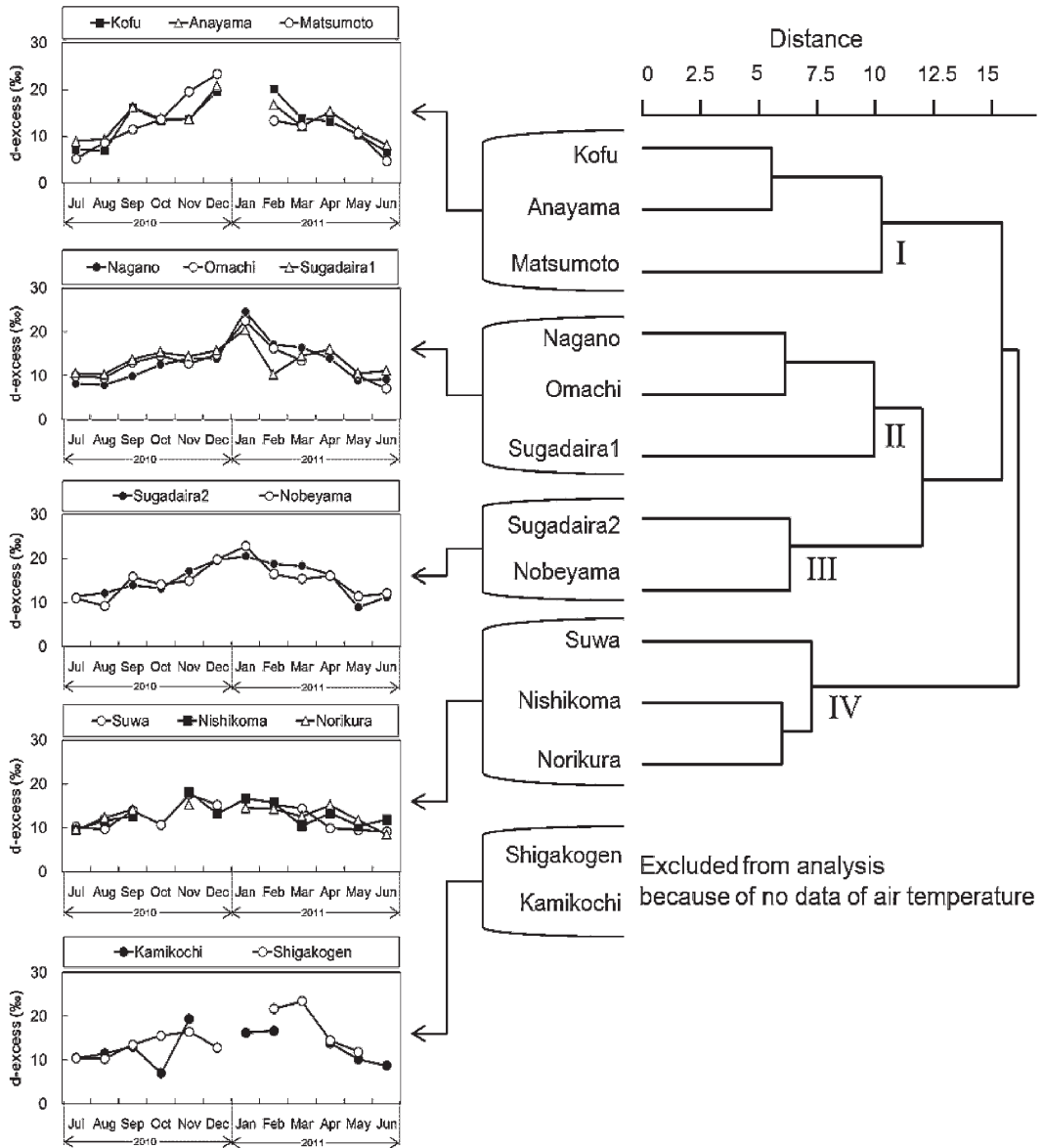


図 4 d-excessを変数とするクラスター分析によって作成されたデンドログラム。各月のd-excessを変数として、Ward法を採用し、標準化は行っていない。欠測値に対しては、各地点における気温とd-excessの関係によって得られる直線回帰式で求めた予測値を代入した。非類似度はユークリッド距離とした。志賀高原と上高地は気温データがないため除外した。西穂高はデータ数が少ないため分析から除外した。

Fig. 4 The dendrogram produced by hierarchical clustering for d-excess variations at each sampling point. Ward's method was employed and data were not standardized. Deficits were complemented by liner regression equations derived from the relationship between air temperature and d-excess at each point. The Euclidean distance is the distance metric. Shigakogen and Kamikochi were excluded from this analysis because of a lack of air temperature data. Nishihodaka was excluded from this analysis because of insufficient data.

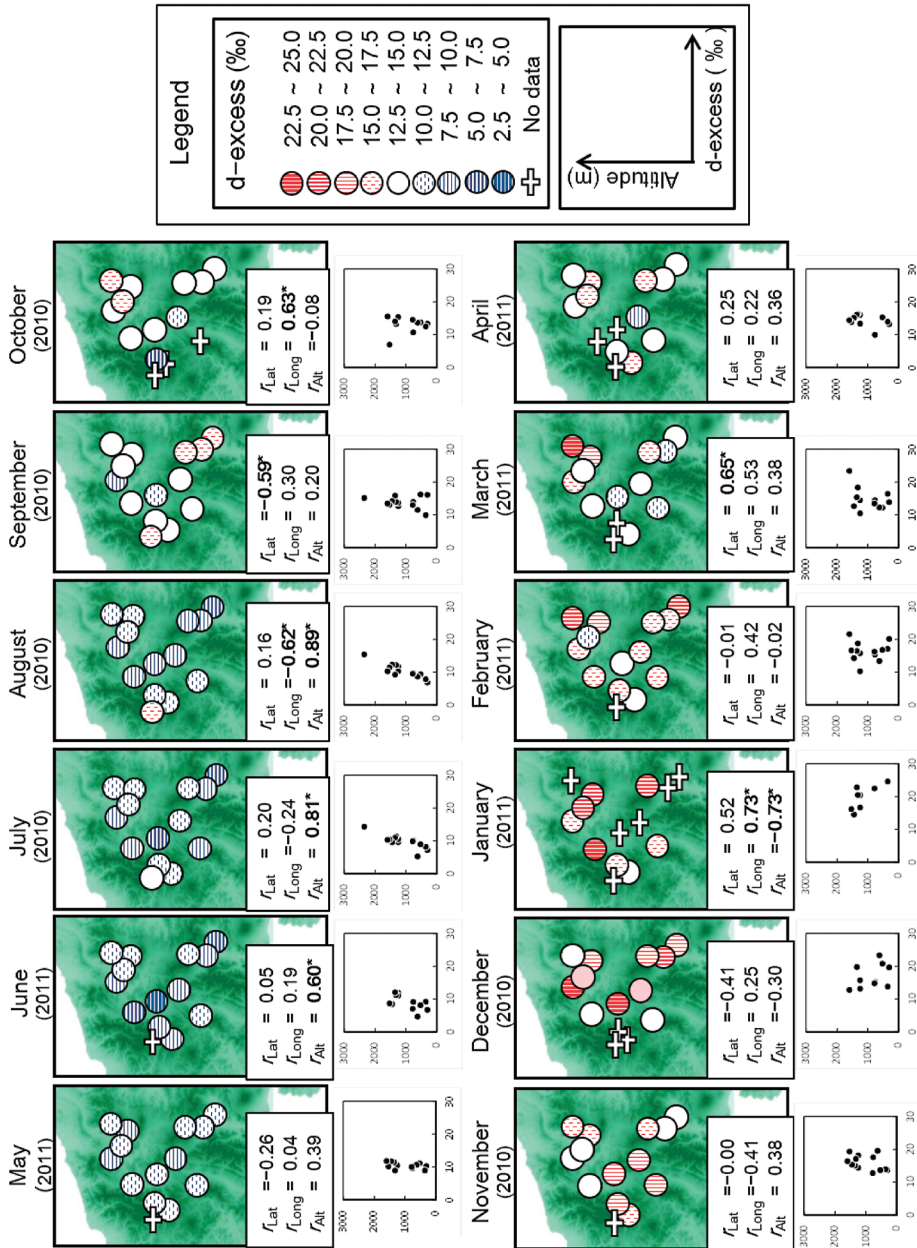


図 5 各月ごとの d-excess の空間分布および標高との関係。 r_{Lat} , r_{Long} , r_{Alt} はそれぞれ d-excess と北緯、東経、標高との相関係数を表す。アスタリスク付の数字は有意水準 0.05 で有意であることを示す。十字は欠測であることを示す。図 3 の気温データに基づき、寒候期を 5 ~ 10 月、暖候期を 11 ~ 4 月とした。

Fig. 5 Spatial distributions of d-excess and relationships between d-excess and altitude. Values of r_{Lat} , r_{Long} , and r_{Alt} mean the correlation coefficient of d-excess with north latitude, east longitude, and altitude, respectively. Numbers followed by an asterisk mean a significant correlation with a level of significance of 0.05. Crosses mean a lack of data. Warm and cold seasons, defined based on air temperature data shown in Fig. 3, are from May to October and from November to April, respectively.

れた。標高との間には、6, 7, 8月に正の相関、1月には負の相関が認められる。地理情報との相関から、d-excessは水平方向での偏りに顕著な季節性はみられないが、標高については夏季に標高依存性が認められることがわかる。

V. 考 察

1) 標高依存性について

以上の結果から、いずれの地点においてもd-excessは夏季から冬季にかけて高くなるという傾向が明瞭にみられた。夏に低く、冬に高いという時間変動は多くの既往研究において報告されており (Dansgaard, 1964; Araguás-Araguás *et al.*, 1998), 本研究の結果もこれらと一致している。一方で、空間分布については、d-excess年平均値と標高との間に正の相関が認められ、とくに夏季にその傾向が顕著にみられた。

夏季に標高依存性が顕著となる理由として、落下中の雨滴の蒸発によるものと考えられる。雲のなかで雨滴が形成され、地上に到達する間に雨滴からは蒸発によって水分子が失われることになる。液相から気相へ水分子が拡散するとき、通常の水分子 (H_2O) よりも重い原子をもった水分子 ($H_2^{18}O$ と HDO) の方が液相に残りやすく、さらに $H_2^{18}O$ と HDO では、 $H_2^{18}O$ の方が液相に残りやすい ($D_{H_2O}/D_{H_2^{18}O} > D_{H_2O}/D_{HDO}$, ここでDは各水分子の分子拡散係数を示す) (Cappa *et al.*, 2003)。雨滴の蒸発のような液相から気相に水分子が移動する一方的な過程 (動的分別) においては、この分子拡散速度の違いが無視できなくなり、 $\delta^{18}O$ に比べて δD が低下しやすく、結果的にd-excessが低下することになる。標高が低い地点ほど落下時間は長く、蒸発の影響をより受けやすくなるため、低標高地ほど低いd-excessが観測されたと考えられる。

この仮説を検証するため、d-excessと標高との間に有意な相関がみられた夏季 (6, 7, 8月) について、比較対象の冬季 (12, 1, 2月) とともにd-excessと $\delta^{18}O$ との関係を調べた (図6)。夏季には両者の間に有意な負の相関がみられる一方で、冬季では無相関である。 $\delta^{18}O$ とd-excess

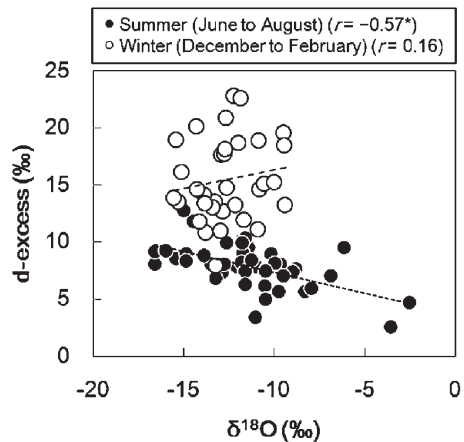


図6 夏季 (6, 7, 8月) と冬季 (12, 1, 2月) におけるd-excessと $\delta^{18}O$ の関係。黒丸が夏季、白丸が冬季のデータを示している。凡例中のアスタリスク付の数字は有意水準0.05で有意であることを示す。

Fig. 6 Relationship between d-excess and $\delta^{18}O$ in summer (June to August) and winter (December to February). Filled and open circles represent data for summer and winter, respectively. A number followed by an asterisk in graph legends means a significant correlation with a level of significance of 0.05.

との負の相関は、雨滴の蒸発によってd-excessが低下するほかにd-excessが一定で $\delta^{18}O$ が低下することによっても得られることになる。降水の $\delta^{18}O$ が低下する原因については、水蒸気源から遠いほど低くなる傾向 (内陸効果) が知られている。中部山岳地域では太平洋と日本海の双方から水蒸気の供給を受けるが、一方からの水蒸気の供給が卓越する場合には内陸効果が顕在化する可能性がある。そこで、 $\delta^{18}O$ と日本海からの距離 (表1) との6, 7, 8月の相関係数をみると、それぞれ-0.06, 0.67, 0.36であり、7月のみ有意な相関が認められ、内陸効果が示唆された。したがって、内陸効果の影響は完全には否定できないが、夏季に関していえば、雨滴の蒸発にともなうd-excessの低下によって標高依存性が表れた可能性が高い。

冬季の無相関について、既往研究では、冬季には降雪粒子と大気中の水蒸気との間の同位体交換

や雨滴の蒸発は起こらないと考えられている (Jouzel and Merlivat, 1984)。このことから、冬季には、夏季のような同位体交換や雨滴の蒸発の影響は受けず、水蒸気塊の d-excess が変化せず降水に直接的に反映されたと考えられる。ただし、図 5 では、1 月には標高と d-excess との負の相関が認められたが、この理由は定かではない。1 月は月を通して、西高東低のいわゆる冬型の気圧配置が多くみられ、この影響を受けた可能性が考えられる。実際に、長野、大町の 2 地点で高い値が観測された。しかし、甲府、穴山、諏訪、松本といった他の低標高域では降水自体が観測されておらず、低標高域でも全般的に高い d-excess が観測されるかは判断できない。

2) 冬季における空間分布

夏季には雨滴の蒸発が d-excess の低下に寄与し、空間分布に影響を与えることがわかったが、冬季の空間分布について規定要因を明らかにすることは重要な課題である。芳村・一柳 (2009) は、同位体大気大循環モデルを用いて、冬季には東アジア海洋域一帯で降水の d-excess が高くなることを示し、さらにシベリア高気圧卓越時と南岸低気圧卓越時を比較した場合、前者で d-excess が高いことを示している。このことから、冬季における d-excess の空間分布が気圧配置によって支配される可能性がある。しかし、太平洋側と日本海側で降水の d-excess を観測し、比較した例は少ない。

そこで、冬季における冬型気圧配置時にもたらされた降水の割合と d-excess との関係性を調べた。冬型気圧配置は気象庁 (2012) による「日々の天気図」および日本気象協会 (2012) による「過去天気」を基に 1 日ごとに冬型気圧配置が優勢であったか否かを判別し、冬型気圧配置と判断された日における各地点直近のアメダス局の日雨量をもって冬型気圧配置時の降水とした。冬型気圧配置時の降水を各地点各月ごとに積算し、この積算値を各月の全降水量で除して、冬型気圧配置時の降水割合とした。

図 7 に、冬季 (12, 1, 2 月) および 3 月における冬型気圧配置時の降水割合と d-excess の関

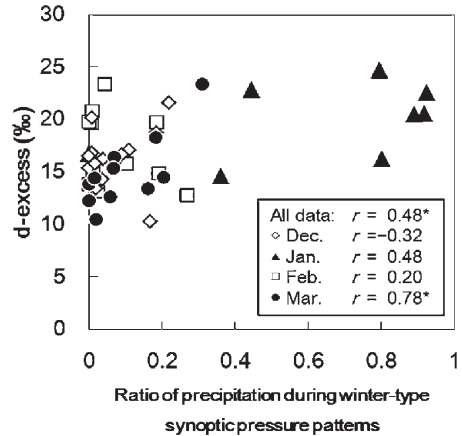


図 7 冬季 (12, 1, 2 月) および 3 月における冬型気圧配置時の降水割合と d-excess の関係. 冬型気圧配置時の降水割合は、冬型気圧配置時と判断された日の降水量の積算値を月積算降水量で除して求めた。凡例中のアスタリスク付の数字は有意水準 0.05 で有意であることを示す。

Fig. 7 Relationships of d-excess to ratio of precipitation under winter-type synoptic pressure patterns in winter (December to February) and March. Ratios of precipitation under winter-type synoptic pressure patterns were calculated by dividing daily precipitation amount during winter synoptic condition by monthly total precipitation amount. Numbers followed by an asterisk in graph legends mean a significant correlation with a level of significance of 0.05.

係を示す。冬季における冬型気圧配置時の降水割合と d-excess との相関係数は 12 月を除いて負の値を示し、1 月、2 月、3 月には正の値を示した。12 月から 3 月までの全データによる冬型気圧配置時の降水割合と d-excess には有意な正の相関が認められた。このことから、中部山岳地域においても、冬型気圧配置時の降水の d-excess が相対的に高い値を示すことがわかった。月ごとにみると、1 月は冬型気圧配置時の降水割合が高い地点が多く、全体的に高い d-excess がみられる。一方で、3 月は冬型気圧配置時の降水割合は低いが、傾きが大きく、冬型気圧配置の影響がより顕著に d-excess の空間分布に反映されることがわかる。この傾向は、図 5 において 3 月に d-excess と北緯との間に正の相関が認められることと符合

している。中部山岳地域では、冬型気圧配置時の降水量が大きいほど d-excess が高くなる傾向があるといえるが、d-excess の上昇に対する冬型気圧配置時の降水の寄与は各月において異なることを留意する必要がある。

3) d-excess による水循環の評価・診断に向けた予察

近年では、ある地域における環境物質中に含まれる酸素・水素・炭素などの安定同位体組成の時空間分布 (Isoscape) を把握して、その地域における環境や生物地球化学的プロセスを評価する研究が進展している (Bowen, 2010)。同様の研究を水循環に応用した例として、Dutton *et al.* (2005) がアメリカ合衆国を対象として行った、降水・河川水・地下水の酸素・水素安定同位体組成の空間分布に基づく流域特性の評価があげられる。日本においても、酸素・水素安定同位体組成を用いて地下水の涵養源を推定する研究が数多く行われてきた (水谷・佐竹, 1997; 風早・安原, 1994)。一方で、d-excess については、韓国の Cheju Island (Lee *et al.*, 1999) や台湾の Chih-Pen Creek basin (Yeh *et al.*, 2011) では、降水の d-excess の季節変動を利用して、降水と地下水の d-excess の観測結果から、地下水に対する雨季と乾季の降水の寄与率を推定した例がある。中部山岳地域においても、d-excess が全地点で夏季に低く、冬季にかけて高くなるという時間変動を示すことが示されており、降水のインプットの時期の推定に利用できる可能性が高い。こうした研究で提示される寄与率算出のための式を暖候期と寒候期の寄与率を求めるための式に修正すると下記のような式となる。

$$d_{\text{out}} = X d_{\text{in, Warm}} + (1 - X) d_{\text{in, Cold}} \quad (4)$$

ここで、 X は暖候期における降水の寄与率、 d_{out} は河川水や地下水などの d-excess (%), $d_{\text{in, Warm}}$, $d_{\text{in, Cold}}$ はそれぞれ暖候期・寒候期に陸域に浸透する降水 (融雪水) の代表的な d-excess (%) である。一般的に、降水が浸透した後、流出するまでの間に均質化されるため、河川水や地下水の $d\delta^{18}\text{O}$, δD は涵養域における降水による年加重平

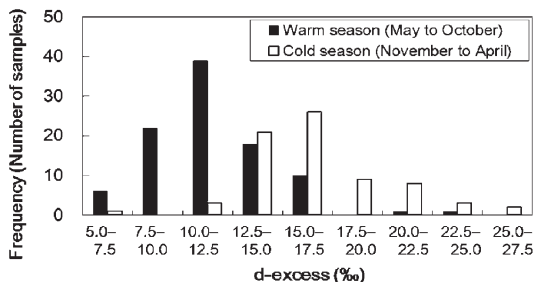


図 8 暖候期・寒候期において観測された d-excess の度数分布図。黒いバーが寒候期、白いバーが暖候期における d-excess の度数 (サンプル数) を示す。図 3 の気温データに基づき、5～10 月を暖候期、11～4 月を寒候期とした。

Fig. 8 Frequency distribution graph of d-excess observed in warm and cold seasons. Black and white bars indicate frequency (Number of samples) of warm and cold seasons, respectively. Warm and cold seasons, defined based on air temperature data shown in Fig. 3, are from May to October and from November to April, respectively.

均値に近い値を示し、変動が 1～2% 程度と小さくなることが報告されており (小宮ほか, 2003; 中村ほか, 2008), d-excess についても同様であると考えられる。しかし、黒部川などの日本海側の河川を調べた水谷・佐竹 (1997) では、河川水の d-excess が 1 年間のうちに 5～10% 程度変動することが報告されている。このように d-excess が季節変動する場合は、暖候期・寒候期の寄与の季節変動を評価することが可能と考えられる。

こうした議論を行うためには、各時期の d-excess の空間分布を把握する必要がある。本研究ではサンプル数が少なく、各月の空間分布を示すことができないので、暖候期・寒候期において観測された d-excess の度数分布を示す (図 8)。度数が最高となった階級は暖候期で 10.0～12.5%, 寒候期で 15.0～17.5% であった。その中間となる 12.5～15.0% の階級では、暖候期・寒候期の度数はそれぞれ 21 と 18 とほぼ同じであり、暖候期と寒候期の分布は重なりが大きい。このため、対象とする河川水の d-excess が 12.5～15.0% の範囲に収まる場合は、式 (4) により寄与率を推定する際に注意が必要である。一方

で、12.5%以下の階級には寒候期の降水の割合は少なく、逆に17.5%以上の階級には暖候期の降水の割合は低い。この結果からは、中部山岳地域内で採取した河川水や地下水をサンプリングした場合、そのd-excessが12.5%以下であれば、おもに暖候期の降水によるものであり、17.5%以上であればおもに寒候期の降水によるものであるとの判断は可能であろう。ただし、図5の結果より、6、7、8月にはd-excessと標高と間に正の相関が認められ、その傾度は0.30～0.34‰/100mの値を示した。このことは、3000m級の山岳域に流入した降水が河川水・地下水等に寄与することを想定すると、夏季でおよそ9%程度の差が表れることを意味している。したがって、d-excess単独で、涵養時期の推定できる可能性は限定的であり、ほかのトレーサーとの併用などを検討する必要があると考えられる。

VI. まとめ

中部山岳地域内14地点における降水安定同位体組成の通年観測の結果、以下の知見が得られた。d-excessはすべての地点で夏季から冬季にかけて高くなる傾向がある。欠測のみられなかった7地点における降水による年荷重平均値の平均値は12.9‰であった。年平均値と標高との間に正の相関が認められたが、北緯・東経との間に相関は認められず、年平均値でみた場合、水平方向での偏りは顕著ではないといえる。標高に関して、夏季には標高が高い地点ほどd-excessが高いという傾向がみられ、冬季に比べて値のばらつきが小さかった。この原因として落下中の雨滴の蒸発が考えられた。冬季には冬型気圧配置時に降水が多い地点でd-excessが高いという傾向がみられた。この結果より、冬型気圧配置時の降水の寄与の程度によって、各地点のd-excessの大きさが決まり、全体の空間分布が規定されると考えられる。また、d-excessの水循環診断への活用を期して、暖候期・寒候期のd-excessの度数分布を調べたところ、両者の最頻値に違いがみられたが、その間の階級では暖候期・寒候期の度数に差異はみられなかった。従って、d-excessによる涵

養時期の定量的な推定の可能性は限定的であると考えられる。

謝辞

本研究は、文部科学省特別教育研究費「中部山岳地域の環境変動の解明から環境資源再生をめざす大学間連携事業」の一部を使用して実施した。また、観測に際して、筑波大学農林技術センター技術職員杉山昌典氏、筑波大学菅平高原実験センター技術職員金井隆治氏、正木大祐氏、信州大学松下知央氏に多大なご支援をいただいた。ここに記して、謝意を表す。

文献

- Araguás-Araguás, L., Froehlich, K. and Rozanski, K. (1998): Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 28721-28742.
- Araguás-Araguás, L., Froehlich, K. and Rozanski, K. (2000): Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrological Processes*, **14**, 1341-1355.
- Bowen, G.J. (2010): Isoscapes: spatial pattern in isotopic biogeochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **38**, 161-187.
- Cappa, C.D., Hendricks, M.B., DePaolo, D.J. and Cohen, R.C. (2003): Isotopic fractionation of water during evaporation. *Journal of Geophysical Research*, **108** (D16), 4525.
- Craig, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- Craig, H. and Gordon, L. (1965): Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. in *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures* edited by Tongiorgi, E., Spoleto, Italy, 9-130.
- Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**, 436-468.
- Dutton, A.D., Wilkinson, B.H., Welker, J.M., Bowen, G.J. and Lohmann, K.C. (2005): Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA. *Hydrological Processes*, **19**, 4121-4146.
- Fudeyasu, H., Ichiyonagi, K., Sugimoto, A., Yoshimura, K., Ueta, A., Yamanaka, M.D. and Ozawa, K. (2008): Isotope ratios of precipitation and water vapor observed in Typhoon Shanshan. *Journal of Geophysical Research*, **113**, D12113.
- Gat, J.R. (2000): Atmospheric water balance—the isotopic perspective. *Hydrological Processes*, **14**, 1357-1369.
- Gedzelman, S.D. and Arnold, R. (1994): Modeling the isotopic composition of precipitation. *Journal of Geophysical Research*, **99** (D5), 10455-10471.

- 檜山哲哉・阿部 理・栗田直幸・藤田耕史・池田健一・橋本重将・辻村真貴・山中 勤 (2008): 水の酸素・水素安定同位体を用いた地球水循環研究と今後の展望. 水文・水資源学会誌, **21**, 158-176. [Hiyama, T., Abe, O., Kurita, N., Fujita, K., Ikeda, K., Hashimoto, S., Tsujimura, M. and Yamanaka, T. (2008): Review and perspective on the water cycle processes using stable isotope of water. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources (Suimon Mizushigen Gakkaishi)*, **21**, 158-176. (in Japanese with English abstract)]
- Johnsen, S.J., Dansgaard, W. and White, J.W.C. (1989): The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions. *Tellus*, **41B**, 452-468.
- Jouzel, J. and Merlivat, L. (1984): Deuterium and oxygen 18 in precipitation: Modeling of the isotopic effects during snow formation. *Journal of Geophysical Research*, **89** (D7), 11749-11757.
- Jouzel, J., Merlivat, L. and Lorius, C. (1982): Deuterium excess in an East Antarctic ice core suggests higher relative humidity at the oceanic surface during the last glacial maximum. *Nature*, **299**, 688-691.
- 風早康平・安原正也 (1994): 湧水の水素同位体比からみた八ヶ岳の地下水の涵養・流動過程. ハイドロロジー, **24**, 107-120. [Kazahaya, K. and Yasuhara, M. (1994): A hydrogen isotopic study of spring waters in Mt. Yatsugatake, Japan: Application to groundwater recharge and flow processes. *Hydrology*, **24**, 107-120. (in Japanese with English abstract)]
- 気象庁 (2012): 日々の天気図. [Japan Meteorological Agency (2012): Hibi No Tenkizu. (in Japanese)] <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html> [Cited 2012/9/25].
- 小宮洋行・中屋眞司・益田晴恵・日下部 実 (2003): 酸素および水素の安定同位体比と水質から見た長野県松本盆地中・南部地域の広域地下水流動系. 地下水学会誌, **45**, 145-168. [Komiya, H., Nakaya, S., Masuda, H. and Kusakabe M. (2003): Groundwater flow system in the central and south part of Matsumoto basin, Nagano, estimated from oxygen and hydrogen stable isotope ratios and water quality. *Journal of Groundwater Hydrology (Chikasui Gakkaishi)*, **45**, 145-168. (in Japanese with English abstract)]
- Kondoh, A. and Shimada, J. (1997): The origin of precipitation in eastern Asia by deuterium excess. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, **10**, 627-629.
- Lai, C.T. and Ehleringer, J.R. (2011): Deuterium excess reveals diurnal sources of water vapor in forest air. *Oecologia*, **165**, 213-223.
- Lee, K.S., Wenner, D.B. and Lee, I. (1999): Using H- and O-isotopic data for estimating the relative contributions of rainy and dry season precipitation to groundwater: Example from Cheju Island, Korea. *Journal of Hydrology*, **222**, 65-74.
- McGuire, K.J. and McDonnell, J.J. (2006): A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology*, **330**, 543-563.
- 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. 地下水学会誌, **39**, 287-297. [Mizutani, Y. and Satake, H. (1997): Hydrogen and oxygen isotope compositions of river waters as an index of the source of groundwaters. *Journal of Groundwater Hydrology (Chikasui Gakkaishi)*, **39**, 287-297. (in Japanese with English abstract)]
- 中村高志・長田淑美・風間ふたば (2008): 水素・酸素および窒素安定同位体組成からみた甲府盆地東部地下水の涵養減と硝酸イオン濃度分布特性. 水環境学会誌, **31**, 87-92. [Nakamura, T., Osada, Y. and Kazama, F. (2008): Identifying the effects of groundwater recharge on nitrate concentration in the eastern Kofu basin using ^2H , ^{18}O and ^{15}N . *Journal of Japan Society on Water Environment (Mizu Kankyou Gakkaishi)*, **31**, 87-92. (in Japanese with English abstract)]
- 中村太郎・佐藤 努・安原正也 (2002): 御嶽山南東斜面における天水の高度効果. 日本水文科学会誌, **32**, 135-147. [Nakamura, T., Sato, T. and Yasuhara, M. (2002): Isotopic altitude effects of meteoric water in the south east slope of Mt. Ontake, Japan. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences (Nihon Suimon Kagaku Kaishi)*, **32**, 135-147. (in Japanese with English abstract)]
- 日本気象協会 (2012): 過去天気. [Japan Weather Association (2012): Kako Tenki. (in Japanese)] <http://tenki.jp/past/> [Cited 2012/9/25].
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L. and Gonfiantini, R. (1992): Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. *Science*, **258**, 981-985.
- 白岩孝行・山口 悟 (2002): カムチャツカ半島の近年の氷河質量収支変動と気候変動復元. 地学雑誌, **111**, 476-485. [Shiraiwa, T. and Yamaguchi, S. (2002): Reconstruction of glacier mass balances and climate changes in the Kamchatka Peninsula. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **111**, 476-485. (in Japanese with English abstract)]
- Soulsby, C., Malcolm, R., Helliwell, R., Ferrier, R.C. and Jenkins, A. (2000): Isotope hydrology of the Allt a' Mharcaidh catchment, Cairngorms, Scotland: Implications for hydrological pathways and residence times. *Hydrological Processes*, **14**, 747-762.
- Tian, L., Yao, T., Li, Z., MacClune, K., Wu, G., Xu, B., Li, Y., Lu, A. and Shen, Y. (2006): Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D13103.
- 遠山和夫・鈴木悟郎・佐竹 洋・川田邦夫・飯田 肇

- (2005) : 酸素同位体比を用いた山岳地積雪の堆積時期推定. 雪氷, **67**, 319-330. [Toyama, K., Suzuki, G., Satake, H., Kawada, K. and Iida, H. (2005): Dating of snow layers in a mountainous area based on the variation of oxygen isotope ratio. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice (Seppyou)*, **67**, 319-330. (in Japanese with English abstract)]
- 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. [Waseda, A. and Nakai, N. (1983): Isotope compositions of meteoric and surface waters in Central and Northeast Japan. *Journal of the Geochemical Society of Japan (Chikyū Kagaku)*, **17**, 83-91. (in Japanese with English abstract)]
- Watanabe, O., Kawamori, N., Sugimoto, A., Iida, H. and Higuchi, K. (1986): Regional characteristics of snow cover in the mountain region of central Japan. *Journal of Earth Science, Nagoya University*, **34**, 67-108.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・辻村真貴・林 陽生 (2008) : 筑波山南斜面における降水の安定同位体比特性. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **9**, 15-23. [Yabusaki, S., Tase, N., Tsujimura, M. and Hayashi, Y. (2008): Characteristics of stable isotopes in precipitation at south slope of Mt. Tsukuba. *Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center (Rikuiiki Kankyo Kenkyu Senta Hokoku)*, **9**, 15-23. (in Japanese with English abstract)]
- 山中 勤・恩田裕一 (2011) : 波長スキャンキャビティリングダウン分光法を用いた水同位体分析計の測定精度について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **12**, 31-40. [Yamanaka, T. and Onda, Y. (2011): On measurement accuracy of liquid water isotope analyzer based on Wavelength-Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy (WS-CRDS). *Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center (Rikuiiki Kankyo Kenkyu Senta Hokoku)*, **12**, 31-40. (in Japanese)]
- Yamanaka, T., Shimada, J. and Miyaoka, K. (2001): Footprint analysis using event-based isotope data for identifying source area of precipitated water. *Journal of Geophysical Research*, **107**, D22, 4624.
- 山中 勤・嶋田 純・宮岡邦任 (2001) : 関東平野における暖候期のイベント降水同位体組成の時空間変動. 日本水文学会誌, **31**, 123-133. [Yamanaka, T., Shimada, J. and Miyaoka, K. (2001): Time-space variation in event-based isotopic composition of precipitation over the Kanto Plain, Japan, during a warm period. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences (Nihon Suimon Kagaku Kai-shi)*, **31**, 123-133. (in Japanese with English abstract)]
- 安原正也・風早康平 (1995) : 富士山における天水の安定同位体組成と地下水の涵養高度. 平成4・5・6年度文部科学省科学研究費総合研究(A) 研究報告書「富士山の地下水流動系の研究」, 42-55. [Yasuhara, M. and Kazahaya, K. (1995): Isotopic composition of meteoric water and recharge elevation on Mt. Fuji. *Research Report of Grants-in-Aid for Scientific Research (A) on 1992, 1993, and 1994, by MEXT, "Research on the groundwater flow system of Mt. Fuji"*, 42-55. (in Japanese)*]
- Yeh, H.F., Lee, C.H. and Hsu, K.C. (2011): Oxygen and hydrogen isotopes for the characteristics of groundwater recharge: a case study from the Chih-Pen Creek basin, Taiwan. *Environmental Earth Sciences*, **62**, 393-402.
- 芳村 圭 (2009) : 気象・気候と水の安定同位体比との関わり (気象学における水安定同位体比の利用). 気象研究ノート, **220**, 1-14. [Yoshimura, K. (2009): The relationships of stable isotope composition of water with meteorological phenomena and climate (applications of stable isotope ratio for meteorology). *Meteorological Research Note (Kisho Kenkyu Noto)*, **220**, 1-14. (in Japanese)*]
- 芳村 圭・一柳錦平 (2009) : 東アジアにおける降水 d-excess 季節変動に関する再考察. 水文水資源学会誌, **22**, 262-276. [Yoshimura, K. and Ichiyonagi, K. (2009): A reconsideration of seasonal variation in precipitation deuterium excess over East Asia. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources (Suimon Mizushigen Gakakkai-shi)*, **22**, 262-276. (in Japanese with English abstract)]

* Title etc. translated by Y.W.