

## 京都大学瀬戸臨海実験所で観測された降水の安定同位体比の変動特性

### Characteristics of stable isotopes in precipitation observed at the Seto Marine Biological Laboratory, Kyoto University

田上雅浩<sup>1</sup>・一柳錦平<sup>2</sup>・望月佑一<sup>3,4</sup>・宮崎勝己<sup>4</sup> Masahiro Tanoue<sup>1</sup>, Kimpei Ichiyanagi<sup>2</sup>, Yuichi Mochizuki<sup>3,4</sup> & Katsumi Miyazaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16)

<sup>2</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)

<sup>3</sup> 一般財団法人九州環境管理協会 (〒813-0004 福岡市東区松香台 1-10-1)

<sup>4</sup> 京都大学フィールド科学教育研究センター瀬戸臨海実験所 (〒649-2211 和歌山県西牟婁郡白浜町 459)

#### はじめに

降水は水文現象のインプットであり、降水の安定同位体比や動的分別の指標である d-excess ( $\delta D - 8 \times \delta^{18}O$  で定義される (Dansgaard, 1964)。ただし、 $\delta D$  は水素の、 $\delta^{18}O$  は酸素の安定同位体比である。) は、水文学や地球化学などの分野で天水の起源・流動・混合のトレーサーとして広く利用されている。そのため、全国各地で降水の安定同位体比の観測が行われてきた。全国的な研究として、田上ほか (2013) は観測期間の異なる過去の研究を収集し、降水中の  $\delta^{18}O$  および d-excess の季節変動と空間分布を初めて明らかにした。しかしながら、この研究では異なった期間で観測されたデータを用いているため、日本全国における降水の安定同位体比の時間空間変動が十分に明らかにされたとは言いがたい。そこで日本水文学会同位体マッピングワーキンググループ (Isotope Mapping Working Group: IMWG) では、2013年に日本全国を対象として降水の安定同位体比の集中観測を行った (一柳, 2013, 2014)。京都大学瀬戸臨海実験所でも IMWG の一環として観測が行われた。本報告では、これにより観測された降水の安定同位体比の解析結果について報告する。

#### 研究方法

降水の安定同位体比の観測は、蒸発防止構造を含んだ採水器を用いて 2012 年 12 月 23 日から 2013 年 12 月 20 日まで、平均採水間隔は 11.1 日 (標準偏差 3.5 日) で行った。降水サンプルの回収後、採水量を漏斗面積で除して降水量を求めた。気温は、京都大学瀬戸臨海実験所で観測された日平均値を使用した。ただし、2013 年 2 月 1 日から 10 日までの気温データが欠損していたため、この期間については気象庁の南紀白浜地点のデータを用いた。気温データの地点間の違いを小さくするため、この期間における気温データは京都大学瀬戸臨海実験所と気象庁観測地点との回帰式を用いて補正した。

瀬戸臨海実験所で観測された降水の安定同位体

比の特性を調べるため、気象庁の季節内予報区分によって分類された西日本・太平洋側に位置する観測地点の領域平均値と比較した。観測地点により採水頻度が異なるため、比較は月単位で行った。降水中の  $\delta^{18}O$  は緯度によって変化するため、降水量で重み付けした年加重平均値からの偏差を用いて比較した。降水中の d-excess は緯度による変化が小さいため、月ごとの絶対値を用いて比較した。領域平均値の算定は、西日本・太平洋側に属する全 20 地点における  $\delta^{18}O$  の月偏差または d-excess の月加重平均値を算術平均して求めた。

採水された降水サンプルは 100 ml のプラスチック製のボトルに封入し、暗所にて分析まで保管した。安定同位体比の分析は熊本大学大学院自然科学研究科のガス同位体比質量分析計 (Delta-V, Thermo Fisher Scientific 社製) により行った。 $\delta^{18}O$  は水-二酸化炭素平衡法により同位体平衡となった二酸化炭素ガスを、 $\delta D$  は白金触媒を用いて同位体平衡となった水素ガスを質量分析に導入して測定を行った。測定誤差は、 $\delta^{18}O$  で  $\pm 0.05\%$ 、 $\delta D$  で  $\pm 0.5\%$  程度である。本報告では、便宜上、各観測期間に ID をつけた。得られたデータを表 1 に示す。

#### 結果と考察

##### 気象要素および降水の安定同位体の季節変動

期間平均した日降水量と日平均気温の季節変化、および降水中の  $\delta^{18}O$  と d-excess の季節変化を図 1 に示す。日平均気温は  $7.1^{\circ}C$  (N-02)  $\sim$   $28.3^{\circ}C$  (N-20) であり、1 月下旬 (N-02,  $7.1^{\circ}C$ ) から 7 月下旬 (N-21,  $28.3^{\circ}C$ ) まで上昇し、8 月下旬 (N-23,  $28.0^{\circ}C$ ) から 12 月上旬 (N-32,  $10.9^{\circ}C$ ) まで低下した。日降水量は  $0.64$  mm/day (N-30)  $\sim$   $29.16$  mm/day (N-16) であり、6 月および 9 月から 10 月にかけて  $10$  mm 以上の期間が見られた。

降水中の  $\delta^{18}O$  は  $-20.4\%$  (N-02)  $\sim$   $-2.3\%$  (N-14) であり、最小値を示した N-02 を除くと、6 月から 9 月では  $-7\%$  程度と低く、それ以外では  $-3\%$  程度と高い傾向が見られた。N-02 の  $\delta^{18}O$  が特に低いのは、1 月 14 日  $\sim$  15 日に発達した南岸低気圧が原因であり、東京都荒川区でもこの期間における降水中の  $\delta^{18}O$  は  $-23\%$  より低かった。

降水中の d-excess は 0.2‰ (N-15) ~ 31.2‰ (N-29) であり、冬季には約 30‰と高く、夏季には約 5‰と低い傾向が見られた。田上ほか (2013) は、冬の日本海側における降水中の d-excess は 30‰となるが、それ以外の地域では 25‰より低いことを報告している。太平洋側に位置する和歌山でも、d-excess が 30‰に達する降水が観測されたのは非常に興味深い。

$\delta^{18}\text{O}$  を X 軸に  $\delta\text{D}$  を Y 軸にした  $\delta$ -ダイアグラムを図 2 に示す。ほとんどのサンプルは、グローバルな天水線 ( $\delta\text{D}=8\times\delta^{18}\text{O}+10$ ) 付近に分布していた。本地点で採水されたサンプルのローカルな天水線は、 $\delta\text{D}=8.83\times\delta^{18}\text{O}+18.99$  ( $R=0.968$ ,  $N=31$ )であった。この天水線は、琵琶湖の  $\delta\text{D}=8.03\times\delta^{18}\text{O}+15.63$  (中山ほか, 2002) や京都盆地の  $\delta\text{D}=8.39\times\delta^{18}\text{O}+15.48$  (藪崎・河野, 2012) と比較して傾きも切片も高かった。本地点で観測された降水の安定同位体比の変動特性を調べるため、IMWG の集中観測によって得られた西日本・太平洋側における領域平均値と比較した。図 3 に瀬戸臨海実験所と西日本・太平洋側における降水中の  $\delta^{18}\text{O}$  と d-excess の月平均値を示す。その結果、本地点で観測された  $\delta^{18}\text{O}$  の季節変動パターンは西日本・太平洋側とよく一致しており、相関係数は 0.75 と統計的に有意であった。ただし、12 月では 4‰以上の大きな差が見られた。同様の結果は、d-excess の季節変動にも見られ、12 月の d-excess の領域平均値は 25‰以下だが、本地点では 30‰と大きかった。

### 同位体効果

気象要素と降水の安定同位体比との関係を調べるため、降水の安定同位体比を期間平均した日平均気温および日降水量と比較した (図 3)。図中の相関係数および帰帰式は、南岸低気圧のため明らかに低い N-02 を除外して求めた。その結果、日平均気温との間に有意な相関関係が認められなかったが、日降水量とは統計的に有意な相関関係が認められた。日降水量との帰帰式は  $\delta^{18}\text{O}=-0.24\times\text{P}-4.57$ 、相関係数は  $-0.698$  であった。この関係は降水量効果と呼ばれ、主に熱帯域で見られる。Araguás-Araguás et al. (1998) は東アジアでは北緯 35 度以南の地域で降水量効果が卓越することを報告しており、北緯 33 度である本地点でも降水量効果が認められたことは興味深い。今後は、他地点でも同様の解析を行い、ローカルな天水線や同位体効果についてまとめていきたい。

### 謝辞

IMWG に協力いただき、降水サンプリングを行っていただいた皆さまに感謝いたします。日本水文学会より 2012 年度から 2014 年度まで研究グループ助成を受けた。また、本研究は JSPS 科研費 (基盤 C : 24510256) の一部を使用した。

### 引用文献

- Araguás-Araguás, L., Froehlich, K. & Rozanski, K. 1998. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 103, 28721, doi: 10.1029/98JD02582.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 436–468.
- 一柳錦平. 2013. 日本水文学会同位体マッピングワーキンググループ (Isotope Mapping Working Group ; JAHS-IMWG) 2012 年度活動報告. *日本水文学会誌*, 43(1): 31–32.
- 一柳錦平. 2014. 日本水文学会同位体マッピングワーキンググループ (Isotope Mapping Working Group ; JAHS-IMWG) 2013 年度活動報告. *日本水文学会誌*, 44(3): 1–3.
- 田上雅浩・一柳錦平・嶋田純. 2013. 日本における降水の安定同位体比の季節変動と空間分布. *日本水文学会誌*, 43(4): 73–91.
- 中山友栄・谷口真人・嶋田純. 2000. 琵琶湖流域における降水と地下水の安定同位体比特性. *陸水学雑誌*, 61: 119–128.
- 藪崎志徳・河野忠. 2012. 京都盆地で採取した標高別降水の安定同位体比特性. *地球環境研究*, 14: 23–30.

表 1. 降水中の安定同位体比、および期間平均した日降水量と日平均気温。

ID	Start	End	$\delta\text{D}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	d-excess (‰)	P (mm/d)	T (°C)
N-01	2012/12/23	2013/01/08	-32.1	-6.5	19.9	3.19	7.2
N-02	2013/01/08	2013/01/20	-158.9	-20.4	4.2	2.05	7.1
N-03	2013/01/20	2013/02/01	-2.8	-4.2	31.0	2.20	7.6
N-04	2013/02/01	2013/02/10	-23.2	-5.5	20.8	3.06	9.2
N-05	2013/02/10	2013/02/20	-24.1	-5.8	22.4	5.14	7.2
N-06	2013/02/20	2013/03/01	-32.4	-6.4	19.0	6.37	8.0
-	2013/03/01	2013/03/10	-	-	-	-	11.6
N-07	2013/03/10	2013/03/19	-17.2	-3.8	13.3	2.36	13.0
N-08	2013/03/19	2013/04/01	-4.2	-3.2	21.0	1.03	12.4
N-09	2013/04/01	2013/04/10	-45.9	-6.6	7.0	4.19	14.9
N-10	2013/04/10	2013/04/18	-13.6	-4.0	18.7	0.67	14.5
N-11	2013/04/18	2013/05/07	-5.4	-2.9	18.0	2.59	15.6
N-12	2013/05/07	2013/05/17	-29.4	-5.1	11.6	6.39	19.0
N-13	2013/05/17	2013/05/27	-35.9	-5.7	9.3	3.30	21.4
N-14	2013/05/27	2013/06/01	-12.1	-2.3	5.9	1.57	22.3
N-15	2013/06/01	2013/06/12	-27.4	-3.5	0.2	0.72	22.1
N-16	2013/06/12	2013/06/22	-72.3	-10.4	11.2	29.16	23.9
N-17	2013/06/22	2013/07/01	-62.4	-8.7	7.1	12.05	23.0
N-18	2013/07/01	2013/07/12	-42.7	-6.4	8.3	4.50	26.2
N-19	2013/07/12	2013/07/23	-46.5	-6.5	5.7	0.71	27.1
N-20	2013/07/23	2013/08/01	-42.1	-6.4	9.1	0.96	28.3
N-21	2013/08/01	2013/08/10	-50.5	-7.3	7.8	0.87	28.1
N-22	2013/08/10	2013/09/01	-58.7	-8.3	7.9	1.64	28.0
N-23	2013/09/01	2013/09/10	-37.3	-6.3	12.9	9.43	25.2
N-24	2013/09/10	2013/10/01	-48.2	-7.2	9.3	14.93	24.5
N-25	2013/10/01	2013/10/12	-10.7	-2.6	9.8	1.21	25.0
N-26	2013/10/12	2013/10/21	-72.2	-10.0	7.7	16.16	19.9
N-27	2013/10/21	2013/11/01	-21.1	-4.8	17.2	2.50	18.9
N-28	2013/11/01	2013/11/11	-52.5	-7.8	9.6	6.52	17.8
N-29	2013/11/11	2013/11/21	-13.0	-5.5	31.2	1.81	12.6
N-30	2013/11/21	2013/12/01	-1.6	-3.0	22.3	0.64	13.0
N-31	2013/12/01	2013/12/12	-13.4	-5.4	30.0	1.14	10.9

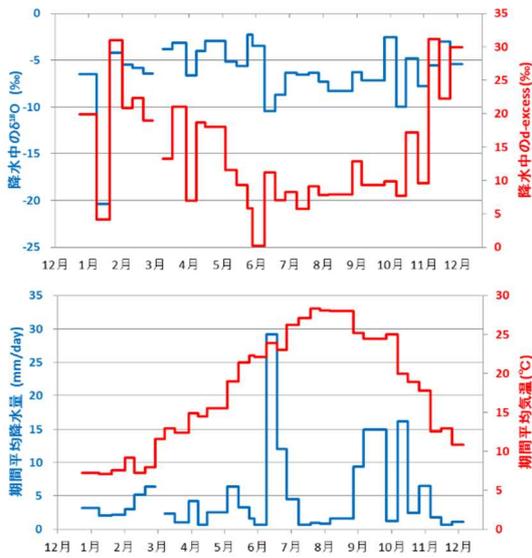


図1. (上段) 瀬戸臨海実験所における降水中の  $\delta^{18}\text{O}$  (青線) と d-excess (赤線) の季節変化。(下段) 同実験所における採水期間中の日降水量 (青線) と日平均気温 (赤線)。

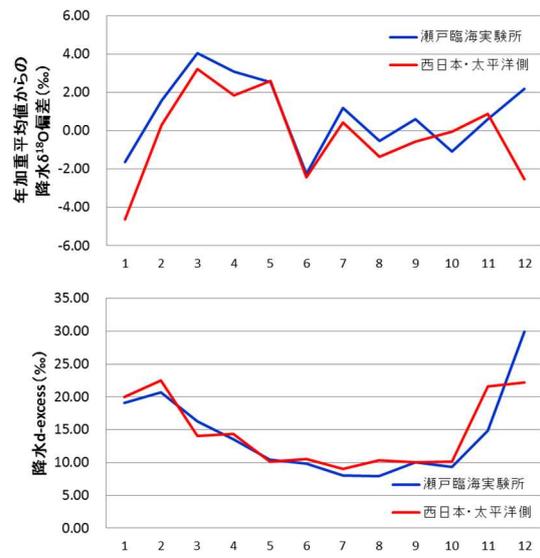


図3. 瀬戸臨海実験所と IMWG によって得られた西日本・太平洋側 (全 20 地点) における降水中の  $\delta^{18}\text{O}$  (上段) と d-excess (下段) の季節変化。

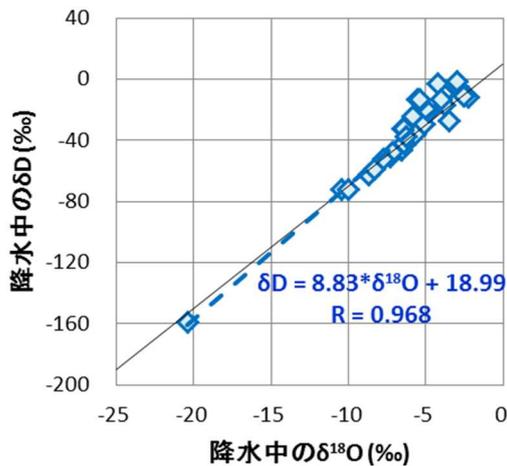


図2. 瀬戸臨海実験所における降水の  $\delta$ -ダイアグラム。黒線はグローバルな天水線 ( $\delta D=8 \times \delta^{18}\text{O}+10$ )、青の点線は瀬戸臨海実験所におけるローカルな天水線を示す。

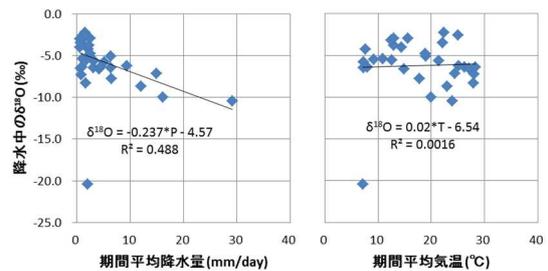


図4. 瀬戸臨海実験所における降水中の  $\delta^{18}\text{O}$  と期間平均した日降水量、または日平均気温との関係。回帰直線とその式、決定係数を示す。回帰直線の計算には、N-02 のサンプルは除外した。