北極徒歩探検によって観測された海氷上の雪の安定同位体比

一柳 錦平^{*1, *3}・荻田 泰永^{*2}・田上 雅浩^{*1}

Stable isotopes in snow on sea ice observed by the Arctic expedition on foot

Kimpei ICHIYANAGI^{*1, *3}, Yasunaga OGITA^{*2} and Masahiro TANOUE^{*1}

Abstract

Stable isotopes in snow on sea ice were observed in the Canadian Arctic Sea. Twenty-three snowpack and four new snow samples were collected along the length of expedition on foot from March to May in 2011. Stable isotopes in snow ranged from -25 to -35‰ in $\delta^{18}\text{O}$ and from 3 to 13‰ in d-excess, and the local meteoric water line (LMWL) is $\delta D = 8.4 \cdot \delta^{18}\text{O} + 18.7$. There are no relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in snow and surface air temperature in this study. Temporal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in snow is influenced by the direction of moisture flux, low (high) $\delta^{18}\text{O}$ in snow exists when southwesterly (northerly or easterly) moisture flux dominants.

Key words: stable isotopes in snow, sea ice, Canadian Arctic Sea, Arctic expedition on foot

1. はじめに

降水の安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, δD) は, International Atomic Energy Agency/Global Network of Isotopes in Precipitation (IAEA/GNIP) によって世界各地で観測されており, 南極やグリーンランドでは地上気温との間によい相関があることが観測されている (Rozanski *et al.*, 1993)。また, 雪氷コアなどの $\delta^{18}\text{O}$ は古気候の復元によく利用されている (Ichiyangi, 2007; Miller *et al.*, 2010)。しかし, 北極圏での降水の安定同位体比の観測は多くなく, とくに海氷上での観測はアクセスが困難なため非常に少ない。近年の地球温暖化によって 2007 年や 2011 年は北極圏の海氷面積が最小記録となり (Ogi and Wallace, 2012), 今後さらに温暖化が進めば海氷上での観測自体ができなくなる

可能性もある。

そこで本研究では, 著者の一人である荻田がカナダ北極圏を徒歩で冒険する際に, 海氷上の雪のサンプリングを実施した (2011 年の北極探検の様子は, <http://www.ogita-exp.com/homepage/2011tabi.html> を参照)。このように貴重な雪サンプルの安定同位体比を分析し, その変動要因について地上気温と大気再解析データより考察する。

2. 研究地域と研究方法

海氷上の雪サンプルは, カナダ北極圏多島海地域の Resolute (74.73° N, 95.20° W) から Gjoa Haven (68.42° N, 96.30° W) までの 1,046km を徒歩で探検する際に (Photo 1), 27 地点において積雪表層部の雪を, 4 地点においてソリに積

* 1 熊本大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

* 2 荻田泰永北極点事務局 Yasunaga Ogita North Pole office

* 3 海洋研究開発機構, 地球環境変動領域 Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

もった新雪を 20ml のポリボトルに詰めて採取した (Table 1)。生死にかかわる冒険のため、時間や労力のかかる積雪深は測定していない。採取期間は 2011 年 3 月 16 日から 5 月 12 日までである。雪サンプルの $\delta^{18}\text{O}$ および δD は、熊本大学自然科学研究科の同位体質量分析装置 (Delta-V)

Photo 1. Arctic expedition on foot.

Fig. 1. Distributions of $\delta^{18}\text{O}$ (a) and d-excess (b) in snow along the expedition from Resolute to Gjoa Haven in Canadian Arctic Sea.

Table 1. Summary of snow sampling observed in this study.

No.	Date	Latitude (° N)	Longitude (° W)	Temp. (°C)	Type of snow	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	d-excess (‰)
1	2011/03/16	74.44.184	95.11.740	-32	snowpack	-256.1	-33.29	10.22
2	2011/03/18	74.48.057	95.51.703	-30	snowpack	-271.7	-35.07	8.87
3	2011/03/21	74.52.674	96.37.207	-19	snowpack	-259.2	-33.64	9.90
4	2011/03/24	74.53.035	97.56.348	-22	new snow	-202.4	-26.61	10.46
5	2011/03/27	74.47.928	99.01.696	-20	new snow	-210.9	-27.92	12.51
6	2011/03/30	74.32.409	99.20.652	-19	new snow	-198.2	-26.21	11.54
7	2011/04/04	74.01.801	99.24.008	-25	snowpack	-204.5	-26.60	8.35
8	2011/04/07	73.40.243	98.55.290	-22	snowpack	-253.3	-32.75	8.72
9	2011/04/15	72.57.650	96.31.235	-20	snowpack	-277.4	-35.56	7.04
10	2011/04/16	72.43.731	96.24.926	-18	snowpack	-184.9	-24.83	13.72
11	2011/04/19	72.01.364	96.25.583	-26	snowpack	-199.1	-25.94	8.40
12	2011/04/21	71.31.794	96.45.414	-25	snowpack	-257.4	-32.74	4.57
13	2011/04/23	71.04.253	97.01.706	-23	snowpack	-242.3	-31.01	5.75
14	2011/04/24	70.50.366	97.08.161	-27	snowpack	-254.2	-32.55	6.16
15	2011/04/27	70.24.378	97.30.905	-20	snowpack	-254.0	-32.58	6.68
16	2011/04/28	70.10.931	97.41.903	-19	snowpack	-255.7	-32.84	7.03
17	2011/04/29	69.58.100	97.51.284	-26	snowpack	-237.9	-30.71	7.81
18	2011/04/30	69.47.987	98.06.928	-22	snowpack	-278.1	-35.30	4.34
19	2011/05/01	69.37.832	98.18.105	-20	new snow	-244.7	-31.78	9.54
20	2011/05/02	69.26.251	98.38.122	-23	snowpack	-255.1	-32.43	4.39
21	2011/05/03	69.13.867	98.56.635	-26	snowpack	-207.9	-26.94	7.63
22	2011/05/04	69.02.487	99.09.891	-15	snowpack	-261.9	-33.71	7.79
23	2011/05/06	68.49.710	98.41.291	-18	snowpack	-266.3	-33.88	4.76
24	2011/05/07	68.43.271	98.11.966	-11	snowpack	-251.0	-31.88	4.03
25	2011/05/09	68.31.349	97.22.316	-12	snowpack	-225.9	-28.75	4.05
26	2011/05/10	68.23.107	97.01.025	-12	snowpack	-206.7	-26.98	9.17
27	2011/05/12	68.25.015	96.19.479	-5	snowpack	-225.5	-28.59	3.21

で平衡法により分析した。測定誤差は $\delta^{18}\text{O}$ で $\pm 0.05\text{‰}$ 、 δD で $\pm 0.5\text{‰}$ である。

他にも、IAEA/GNIP 観測より周辺の Resolute (74.72°N , 85.02°W) と Hall Beach (68.78°N , 98.75°W) における降水の $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD を利用した。観測期間は1989年から1993年までと異なるが、季節は3月から5月に合わせてデータを抽出した。

3. 結果と考察

本研究で採取した雪の $\delta^{18}\text{O}$ とd-excessの分布をFig. 1に示す。 $\delta^{18}\text{O}$ は -25‰ から -35‰ 、d-excessは3‰から13‰の範囲にある。 $\delta^{18}\text{O}$ は変動が大きく顕著な傾向は認められないが、d-excessは 74°N より北では9‰より大きい傾向が認められる。また、 $\delta^{18}\text{O}$ と地上気温の経時変化をFig. 2に示す。3月から4月中旬までの気温は -30°C から -35°C であるが、4月中旬以降は徐々に高くなり、5月に入ると -5°C まで上昇した。雪の $\delta^{18}\text{O}$ は3

Fig. 2. Temporal variations of $\delta^{18}\text{O}$ in snow and observed surface air temperature.

Fig. 3. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ and δD in this study and two IAEA/GNIP stations (left panel) and between surface air temperature and $\delta^{18}\text{O}$ in this study (right panel).

月から4月中旬までは -33‰ 以下と -28‰ 以上に分かれて変動しているが、4月20日以降は -30‰ から -35‰ 、5月9日以降は -28‰ より大きくなった。

次に、本研究と周辺の IAEA/GNIP 観測地点から求めた天水線と、本研究の $\delta^{18}\text{O}$ と地上気温との関係をFig. 3に示す。本研究で採取した雪の $\delta^{18}\text{O}$ はIAEA/GNIP 観測地点の月平均値 (-39‰ から -17‰) の範囲内である。本研究で求めた天水線は $\delta\text{D}=8.4*\delta^{18}\text{O}+18.7$ であるが、Resolute と Hall Beach はそれぞれ $\delta\text{D}=7.6*\delta^{18}\text{O}+1.2$ と $\delta\text{D}=7.8*\delta^{18}\text{O}+6.6$ である。観測期間が異なるので単純には比較できないが、天水線の傾きや切片が大きく違うのは非常に興味深い。これは、北極圏では気候変動や温暖化の影響を受けやすいため、観測年によって天水線が大きく変動するのかもしれない。

また、従来の研究では $\delta^{18}\text{O}$ の年平均値や月平均値は地上気温とよい相関が認められるが、本研究で採取した雪の $\delta^{18}\text{O}$ と地上気温の間には全く相関が無い ($n=27$, $r^2=0.03$)。この原因としては、本研究では過去数日間の積雪や新雪を採取しているため、積雪日の地上気温と一致していないことが考えられる。また、降雪後にブリザードによって攪乱された可能性もある。

さらに $\delta^{18}\text{O}$ の変動要因を考察するため、観測地域周辺の大気再解析データ (JCDAS, Onogi *et al.*, 2007) の地上気温と、鉛直積分した水蒸気フラックスの分布をFig. 4に示す。 $\delta^{18}\text{O}$ が -30‰ より小さい時期 (3月16日から21日、4月7日

Fig. 4. Distributions of daily surface air temperature (contour, degree Celsius) and water vapor flux (arrow, kg/m/s) averaged in each observation period by using JCDAS reanalysis. Rectangular, square, and triangle indicate observation field in this study, Resolute and Hall Beach, respectively. Contour interval is 3 °C.

から 15 日, 4 月 21 日から 5 月 3 日) と大きい時期 (3 月 24 日から 4 月 4 日, 4 月 16 日から 19 日, 5 月 9 日から 12 日) に分けて, その間の気温と水蒸気フラックスの日平均値を示す。その結果, $\delta^{18}\text{O}$ が -30‰ より小さい時期には北または東からの水蒸気フラックスが卓越しており, 気温は -30°C 程度と低い。反対に, $\delta^{18}\text{O}$ が大きい時期には南西からの水蒸気フラックスが卓越しており, 気温は -25°C より高い。しかし, 4 月 16 日から 19 日だけは $\delta^{18}\text{O}$ は -25‰ 程度と大きいにも関わらず, 北からの水蒸気フラックスが卓越しており,

気温は -28°C 程度と低い。

このように, 本研究で採取された雪の $\delta^{18}\text{O}$ の変動は地上気温とは相関が無く, 水蒸気フラックスの卓越方向の影響を受けていることが明らかとなった。北極圏の降水の安定同位体比について, 水蒸気の起源を含めた変動要因や温暖化による影響など, さらに研究を進める必要がある。

4. まとめ

カナダ北極海の海氷上の雪の安定同位体比の観

測より、以下の事が明らかとなった。

1. 本研究で採取した雪の $\delta^{18}\text{O}$ は -25‰ から -35‰, d-excess は 3‰ から 13‰ の範囲にあり, 天水線は $\delta\text{D}=8.4*\delta^{18}\text{O}+18.7$ である。観測期間は異なるが, 周辺の IAEA/GNIP 観測の天水線とは全く異なる。
2. $\delta^{18}\text{O}$ と地上気温との間には, 相関は全く認められない。この原因としては, 過去数日間の積雪や新雪を採取しているため, 積雪日の地上気温と一致していない, あるいは降雪後にブリザードによって攪乱された可能性が考えられる。
3. $\delta^{18}\text{O}$ の変動は水蒸気フラックスの卓越方向の影響を受けており, $\delta^{18}\text{O}$ が小さい時期には北または東から, $\delta^{18}\text{O}$ が大きい時期には南西からの水蒸気フラックスが卓越している。

謝 辞

利用した大気再解析データセット (JCDAS) は, 気象庁及び電力中央研究所による JRA-25 長期再解析プロジェクトにより提供されたものである。北極探検を支援してくださった皆様に感謝致します。

引用文献

- Ichianagi, K., Numaguti, A., and Kato, K. (2002): Interannual variation of stable isotopes in Antarctic precipitation response to El Niño–Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **29** (1), doi:10.1029/2000GL012815.
- Ichianagi, K. (2007): Review: Studies and applications of stable isotopes in precipitation. *J. Jpn. Assoc. Hydrol. Sci.*, **37** (4), 165-185.
- Miller, G.H., J. Brigham-Grette, R.B. Alley, L. Anderson, H.A. Bauch, M.S.V. Douglas, M.E. Edwards, S.A. Elias, B.P. Finney, J.J. Fitzpatrick, S.V. Funder, T.D. Herbert, L.D. Hinzman, D.S. Kaufman, G.M. MacDonald, L. Polyak, A. Robock, M.C. Serreze, J.P. Smol, R. Spielhagen, J.W.C. White, A.P. Wolfe, E.W. Wolff (2010): Temperature and precipitation history of the Arctic, *Quat. Sci. Rev.*, **29**, 1679-1715.
- Ogi, M., and J. M. Wallace (2012): The role of summer surface wind anomalies in the summer Arctic sea ice extent in 2010 and 2011, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L09704, doi:10.1029/2012GL051330.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kado-kura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira (2007): The JRA-25Reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., and Gonfiantini, R. (1993): Isotopic patterns in modern global precipitation. In *Climate Change in Continental Isotopic Records*, *Geophys. Monogr. Ser.*, **78**, edited by Swart, P. R., Lohmann, K. C., McKenzie, J., and Savin, S., AGU, Washington D.C., pp. 1-36.

(原稿受付：2012年11月27日)

(原稿受理：2013年1月15日)

この論文に対する「討論」を2013年8月31日まで受け付けます。