

南大洋における降雪の酸素安定同位体比の緯度分布と季節変化

中村佳代¹・青木 茂^{1*}・豊田威信¹・青山雄一^{2,3}

Meridional distribution and seasonal variation of stable oxygen isotope ratio of precipitation in the Southern Ocean

Kayo Nakamura¹, Shigeru Aoki^{1*}, Takenobu Toyota¹ and
Yuichi Aoyama^{2,3}

(2010年3月4日受付; 2010年5月12日受理)

Abstract: The stable oxygen isotope ratio ($\delta^{18}\text{O}$) in precipitation is known to have important meridional and seasonal variations, but there are almost no measurements of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over polar oceans. The present research took advantage of 4 opportunities for in situ observations in summer and winter at high latitudes in the Southern Ocean. In addition, we analyzed samples of precipitation at Syowa Station in 2008 to obtain year-round data. Based on these data, we consider the meridional and seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Southern Ocean. In general, $\delta^{18}\text{O}$ decreases with increasing latitude, and is lower in winter than in summer. The latitude gradient is stronger in winter. At 60°S, $\delta^{18}\text{O}$ is -5.4‰ and -11.3‰ in summer and winter, respectively, while the corresponding figures at 66°S are -10.5‰ and -20.8‰ . These results will help us understand the mechanisms of the salinity distribution and its variation in the Antarctic Ocean.

要旨: 降雪の酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の緯度分布と季節変化の存在はよく知られているが、極域海洋上での降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の報告はほとんどない。本研究では、南大洋高緯度域において、夏季と冬季の4つの現場海洋観測の機会を利用し、船上に降った雪を採取し分析した。また、通年のデータとして、2008年における昭和基地での降雪のサンプルを分析した。これらに基づいて、南大洋上の降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の緯度分布と季節変化について考察する。全般に高緯度ほど低く、また夏季より冬季の方が低い $\delta^{18}\text{O}$ の分布が得られた。ま

¹ 北海道大学低温科学研究所, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-0819.

² 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

³ 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻, Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

* Corresponding author. E-mail: shigeru@lowtem.hokudai.ac.jp

た、緯度変化の傾きは冬季の方が強い。夏季および冬季の $\delta^{18}\text{O}$ は、60°S において -5.4‰ と -11.3‰ であるのに対し、66°S において -10.5‰ と -20.8‰ であった。これらの結果は、南極海での塩分分布やその変化のメカニズムを解明する上での手助けになると考えられる。

1. はじめに

近年、重要な問題となっている地球規模の気候変動の中で、極域海洋は気候形成にかかわる重要な役割を果たしている。地球温暖化と同期して、南極海では、南極底層水や陸棚水に顕著な水塊特性の変化が見られている (eg. Aoki *et al.*, 2005; Jacobs *et al.*, 2002)。しかしながら、これらの水塊特性の変化の実態とその原因については、いまだに十分把握されていない。

南極海を構成する水塊の特性が決まる上で、降雪や氷床・棚氷の融解といった淡水フラックスの影響は重要である。淡水フラックスの変化が密度成層を変化させることで、地球規模の深層循環に影響を与える可能性もある。一般的に、温暖化に伴って高緯度域での降雪量が増加し、海洋表層の塩分を低下させる要因になるとされる (eg. Bindoff *et al.*, 2007)。特に、南極海外洋域では降雪(水)一蒸発量が海洋表層の密度成層の形成に重要な役割を果たしていると考えられる。一方、南極海沿岸域では、氷床・棚氷融解による塩分低下の可能性も指摘されている (Jacobs *et al.*, 2002)。しかしながら、これらの淡水フラックスの絶対量や時間変化の見積もりについては、現在でも大きな不確実性があり (Mayewski *et al.*, 2009)、塩分からだけでは、変化の原因を特定することは難しい。ここで、降雪と氷床・棚氷を起源とする淡水は、塩分は 0 で等しいものの異なる酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) をもつため、酸素安定同位体比は淡水分の起源推定の際に有力である (Heywood *et al.*, 1998)。また、塩分変化と $\delta^{18}\text{O}$ の変化を同時に測定することにより、変化をもたらした淡水成分の起源がある程度推定できる。このため、降雪の酸素安定同位体比 $\delta^{18}\text{O}$ を精度よく決定することは、海洋の塩分構造を規定する要因のひとつを定量的に特定することにもつながる。

南極沿岸基地における降雪の $\delta^{18}\text{O}$ は、季節的に変動することが知られている。Picciotto *et al.* (1960) は、ロアボードワン基地で夏季に高く冬季に低い傾向を見出し、前者を isotopic summer、後者を isotopic winter と区分した。Kato (1978) は、昭和基地における降雪の通年観測に基づき、こうした季節変化が、気温変化に加えて水蒸気輸送過程にも依存すると指摘した。また、こうした季節的な変化に加え、 $\delta^{18}\text{O}$ は高緯度に行くほど低下するという緯度分布を示すことが知られている (Craig, 1961)。同時に、夏季と冬季では、夏季に比べて冬季の方が、 $\delta^{18}\text{O}$ の低下の割合が大きいという傾向が指摘されている (Fricke and O'Neil, 1999)。こうした結果は、北半球や陸上での観測値に基づいている。しかしながら、南極海上においては、水蒸気に関しては観測があるものの (Schwarz *et al.*, 1996; Uemura *et al.*, 2008)、直接海洋に影響を与える降雪に関する観測データは報告されていない。ま

た、南極沿岸基地の降雪の $\delta^{18}\text{O}$ から緯度分布を求めた研究があるが(Eicken *et al.*, 1994), 地域も限られており, また実際に海洋上で取得されたものではない. そこで, 本研究では, 現場観測で採取された降雪試料を用いて, 海洋上における降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の緯度分布特性, およびその季節変化を直接的に捉えることを目的とした. 夏季・冬季のそれぞれについて, 現場海洋観測が行われている機会を利用し, 船上で降雪に遭遇した場合にそのサンプルを採取し, $\delta^{18}\text{O}$ を分析した. また昭和基地で, 第 49 次隊の越冬期間中 (2008 年) に降雪のサンプルを通年採取し, 併せて解析した. 昭和基地での観測値は, 南極海の南限での値として考えることができる. 本論文では, 上記のようにして得られた降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変化及び緯度分布特性について報告する. また得られた降雪と海洋表層水の $\delta^{18}\text{O}$ 分布に基づき, 降雪が実際に海洋表層に与える影響について議論する.

2. 酸素安定同位体比の測定方法とサンプルの取得方法

降雪の酸素安定同位体比 $\delta^{18}\text{O}$ は, サンプルと酸素同位体交換平衡にした二酸化炭素の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比に基づき, 安定同位体比質量分析計によって測定する. 通常, ウィーン標準平均海水 (VSMOW) を基準として, 次のように表記される.

$$\delta^{18}\text{O} = \left\{ \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{vsmow}}} - 1 \right\} \times 1000 \text{ (‰)}. \quad (1)$$

$\delta^{18}\text{O}$ の分析には, Finnigan 社製 DELTA plus を用いた. サンプルは, 18°C の恒温水層の中で約 8 時間をかけて CO_2 と平衡させた. サンプルは, 降雪後に 30 ml 以上を採取し, 密封して融解させた後, 30 ml のガラスバイアルに充填した. バイアルは, 内蓋を入れてスクリュウキャップを閉めた後, パラフィルムで密閉し, 分析直前まで冷蔵保存した. ここで用いたサンプルについての直接的な誤差評価は行っていないが, 同手法で約 200 個の海水サンプルを 2 回ずつ測定した時の両者の差の標準偏差が 0.02‰ であったことから, 本測定の確度も同程度と考えられる.

3. データ

3.1. 昭和基地のデータ

降雪サンプルとして, 昭和基地 ($39^\circ 34' \text{E}$, $69^\circ 00' \text{S}$ 地学棟近傍) において, 2008 年 3 月から 12 月にかけて, 降雪を 11 試料採取した. なお, サンプルングは降雪のあった機会すべてについてではなく, 他の観測作業の合間をみて行った. これらの降雪の $\delta^{18}\text{O}$ を分析した結果を, 日平均気温とともに表 1 に示す.

表 1 2008 年昭和基地における降雪の $\delta^{18}\text{O}$ と日平均気温
 Table 1. $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and daily-mean temperature in 2008 at Syowa Station.

Date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
2008/03/07	-22.9	-7.1
2008/04/04	-18.7	-13.1
2008/05/31	-20.9	-24.9
2008/06/24	-33.0	-25.3
2008/07/17	-27.3	-7.8
2008/08/27	-34.5	-20.8
2008/09/27	-25.0	-13.1
2008/10/31	-31.8	-12.4
2008/12/01	-21.0	-2.7
2008/12/05	-12.3	-2.4
2008/12/11	-14.0	-2.2

3.2. 船上データ

海洋上においては、図 1 のような測点で、降雪を船上で直接採取した。夏季と冬季の計 32 サンプルを取得し分析した (図 1)。夏季については、豪日観測計画 BROKE (Baseline Research on Oceanography, Krill and the Environment)-West として *Aurora Australis* により取得された 2006 年 1 月 20 日から 3 月 4 日までの 13 試料、および 2007 / 2008 年南極夏季共同観測として東京海洋大学海鷹丸により取得された 2007 年 12 月 29 日と 2008 年 1 月 1 日の 4 試料を使用した。冬季については、独観測計画 WWOS (Winter Weddell Outflow Study) として *Polarstern* により取得した 2006 年 9 月 6 日から 10 月 15 日までの 6 試料、豪日観測計画 SIPEX (Sea Ice Physics and Ecosystem Experiment) 2007 として *Aurora Australis* により取得した 2007 年 9 月 14 日から 10 月 5 日までの 9 試料を使用した。試料は、サンプリングに十分な積雪深 (~3 cm 以上) があつたすべての場合について、降雪イベント終了後に取得した。これらの試料の分析結果を表 2 に示す。

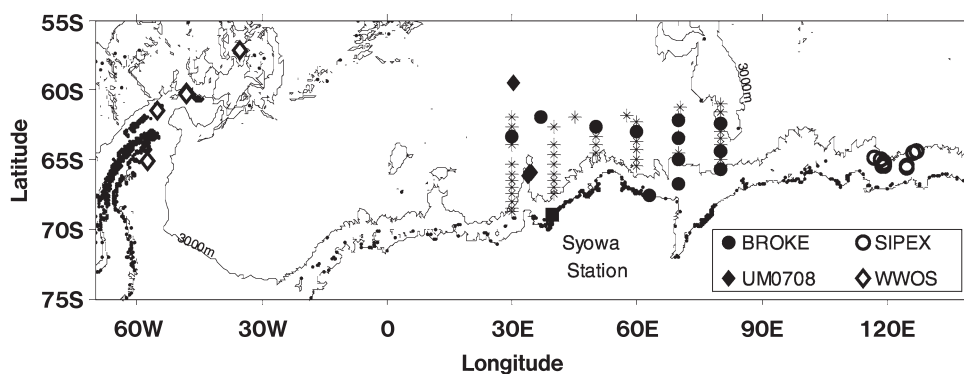


図 1 観測海域と観測点分布。* は海水サンプルの採取点を示す。

Fig. 1. Observation area and point distribution. Asterisks denote sampling points of sea water.

表 2 BROKE-West, WWOS, SIPEX2007, 2007/2008 年南極夏季共同観測における降雪の $\delta^{18}\text{O}$ と日平均気温

Table 2. $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and daily-mean temperature obtained by the observations of the BROKE-West, WWOS, SIPEX2007, and Umitaka-Maru summer cruise in 2007/2008.

Longitude	Latitude	Date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Temperature (°C)
30°00'E	63°20'S	2006/01/20	-6.0	-0.1
37°07'E	62°00'S	2006/01/26	-6.9	-0.7
49°59'E	62°37'S	2006/02/03	-2.5	0.4
49°59'E	62°40'S	2006/02/03	-3.1	0.4
60°00'E	63°00'S	2006/02/09	-8.5	-0.2
62°52'E	67°36'S	2006/02/13	-11.2	-3.6
70°00'E	62°11'S	2006/02/17	-11.7	-1.1
70°00'E	63°29'S	2006/02/18	-12.2	-1.6
69°59'E	65°00'S	2006/02/19	-16.9	-2.2
70°00'E	66°44'S	2006/02/20	-10.2	-5.2
80°00'E	64°23'S	2006/02/26	-9.9	0.0
80°00'E	65°44'S	2006/02/27	-3.7	-3.2
80°07'E	62°26'S	2006/03/04	-13.3	-7.3
35°06'W	57°09'S	2006/09/06	-7.2	-11.2
48°15'W	60°10'S	2006/09/12	-20.3	-4.4
47°58'W	60°48'S	2006/09/21	-7.5	-8.8
48°00'W	60°18'S	2006/09/21	-7.7	-8.8
57°24'W	65°07'S	2006/10/07	-24.4	-6.3
54°54'W	61°30'S	2006/10/15	-20.3	-1.3
127°01'E	64°25'S	2007/09/14	-10.6	-19.5
126°08'E	64°34'S	2007/09/16	-17.3	-12.6
124°45'E	65°32'S	2007/09/19	-30.3	-17.7
124°45'E	65°31'S	2007/09/20	-20.0	-14.6
119°18'E	65°30'S	2007/09/24	-15.6	-5.8
119°02'E	65°30'S	2007/09/25	-21.6	-7.4
119°23'E	65°15'S	2007/09/29	-9.2	-16.1
118°29'E	65°02'S	2007/10/02	-20.3	-11.3
117°03'E	64°55'S	2007/10/05	-13.2	-8.5
30°17'E	59°28'S	2007/12/29	-6.1	-0.4
34°23'E	65°58'S	2008/01/01	-4.9	-1.3
34°40'E	65°57'S	2008/01/01	-12.6	-1.3
34°00'E	66°10'S	2008/01/01	-2.8	-1.3

3.3. 海洋表層水

海洋表層における淡水流入の影響について考察するために、BROKE-West 時において冬季水から周極深層水までの層（およそ 70-400 m 深）から得られた海水サンプルの $\delta^{18}\text{O}$ と塩分の関係を調べた。サンプルについては、図 1 に示す 45 測点で、1 測点につき 2-5 点を抽出し、計 147 個のデータを使用した。なお、抽出方法としては、水温が極小（冬季水）の点と極大（周極深層水）の点とを選び、その間にもサンプルがある場合は、それらの点も付け加えた。

4. 結 果

4.1. 昭和基地における降雪の季節変動

降水中 $\delta^{18}\text{O}$ の近年における季節変化の様態を確認するために、2008 年に取得した昭和基地のデータを考察する。昭和基地における降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の各分析値を図 2 に示す。 $\delta^{18}\text{O}$ 値は、3 月から 6 月上旬までと 12 月は $-22.9\sim-12.3\%$ であるが、6 月下旬から 11 月までの間では $-34.5\sim-25.0\%$ であり、夏季に大きく冬季に小さい値をとるといった明瞭な季節的変動を示す。Picciotto *et al.* (1960) は、1958 年に採取した降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値が、isotopic summer (5 月~10 月) と isotopic winter (11 月~4 月) の 2 つのグループに分かれることを指摘しているが、今回の昭和基地での降雪もこれとほぼ同様の变化を示している。

こうした $\delta^{18}\text{O}$ の値には、降雪形成時の気温が影響すると考えられているが、実際には降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値をその真の生成温度との関係において考察するのは困難であり、多くの場合は地上気温との関係で考察されている(加藤, 1979)。その際、個々の降雪についての $\delta^{18}\text{O}$ 値と気温の瞬間値あるいは日平均値との対応よりも、月平均値あるいは年平均値などの時間平均値どうしの対応が良い。そこで、加藤(1979)が昭和基地で 1974 年に採取した降雪に対して得た結果(Kato, 1977)と同様に、1974 年の気温および $\delta^{18}\text{O}$ の月平均値と 2008 年の測定結果を比較検討してみる。ただし、2008 年の $\delta^{18}\text{O}$ に関しては、12 月は 3 サンプルあるものの、他の月に関しては 1 サンプルしかないので、サンプルが複数ある場合はその平均値を、1 つの場合はそのサンプルの値を代表値として用いた。

1974 年と 2008 年の月平均気温を比較すると、1 月から 5 月にかけて、同じように低下している(図 3)。 $\delta^{18}\text{O}$ は、1974 年については 2 月から 5 月まで低下傾向を示し、2008 年については 3 月の値が低いものの、4 月から 5 月にかけて低下していた(図 4)。6 月から 10

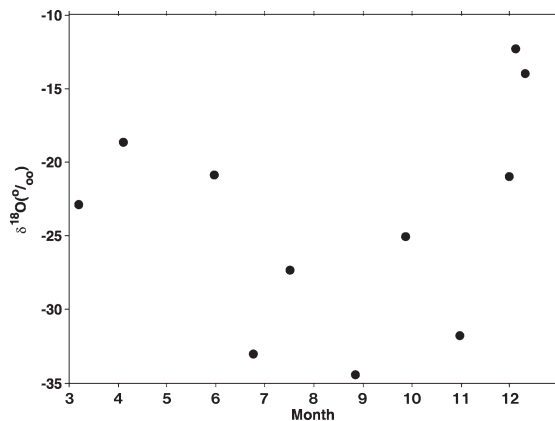


図 2 昭和基地における 2008 年の降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値
 Fig. 2. Seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in 2008 at Syowa Station.

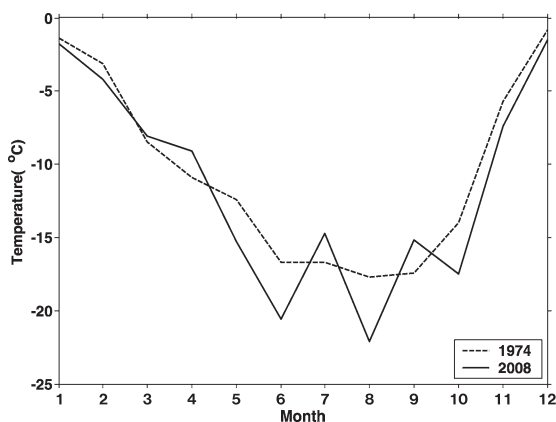


図3 昭和基地における1974年と2008年の月平均気温
 Fig. 3. Monthly mean temperatures in 1974 and 2008 at Syowa Station.

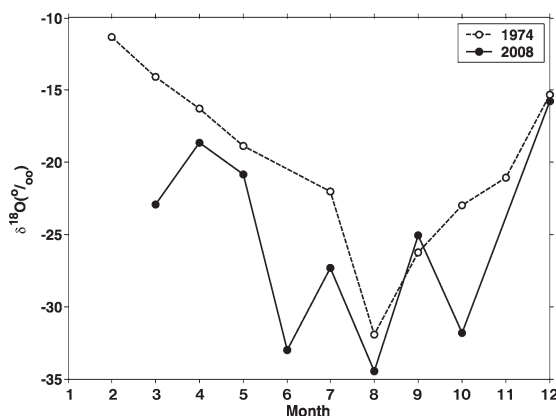


図4 昭和基地における1974年と2008年の降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の月平均値。ただし、データがひとつしかない月はその値で代表した。

Fig. 4. Monthly mean $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in 1974 and 2008 at Syowa Station. In a month with only one datum, that datum was adopted as the representative value.

月の気温は、1974年には約 -17°C 程度のほぼ一定の低温で推移しているのに比べ、2008年では月ごとの短周期(季節内周期)の変動が激しい。2008年の $\delta^{18}\text{O}$ の月平均値の6月から10月の変動は、この短周期の気温変動の位相と良く対応している。ここで、1974年の8月は、図4より $\delta^{18}\text{O}$ が異常に小さい。加藤ほか(1979)によると、この年の8月は、昭和基地が高気圧圏内にあることが多く、低気圧による $\delta^{18}\text{O}$ の大きい水蒸気の輸送量が少なかったと考えられる。一方、2008年の8月の月平均気圧は、気候学的月平均値と大きな差がなく、通常気圧配置状態にあったと考えられる。その後、10月から12月にかけて、気温および $\delta^{18}\text{O}$ ともに増加していた。

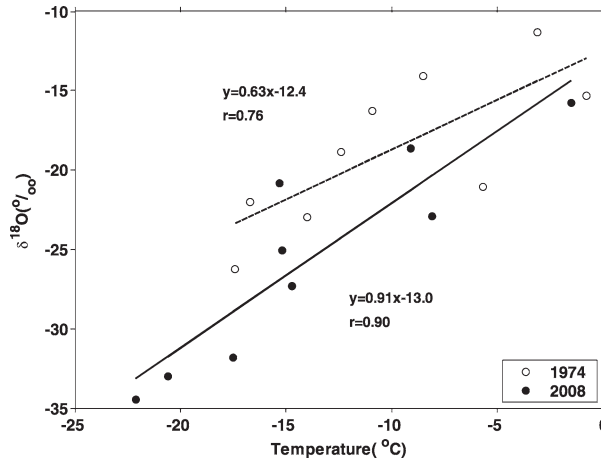


図5 昭和基地における1974年と2008年の月平均気温と $\delta^{18}\text{O}$ の月平均値の比較
 実線は2008年、点線は1974年についての両者の回帰直線を示す。

Fig. 5. Comparison of monthly mean temperature and $\delta^{18}\text{O}$ in 1974 and 2008 at Syowa Station. Solid and broken lines denote regression lines in 2008 and 1974, respectively.

さらに、降雪の $\delta^{18}\text{O}$ と気温の関係を定量的に調べるため、回帰直線を求めた(図5)。ここでは加藤(1979)に従い、1974年8月の $\delta^{18}\text{O}$ は、上記のように通常と異なる大気場にあったと考えて、除外して議論を進める。気温と $\delta^{18}\text{O}$ の相関係数は、2008年が0.90、1974年が0.76になり、各年とも気温と $\delta^{18}\text{O}$ の良い相関を示している。よって、 $\delta^{18}\text{O}$ は気温に強く関係し、気温の季節変化に伴った季節的变化を示すことが改めて裏付けられた。

4.2. $\delta^{18}\text{O}$ の緯度分布とその季節変化

前節にみられるような、季節による相違を考慮して、夏季のBROKE-Westと2007/2008年南極共同観測、および冬季のSIPEX2007とWWOSとに分けて、船上で直接採取した降雪データより、南極沿岸海域での $\delta^{18}\text{O}$ 値の緯度分布を考える。1, 2, 12月のデータを夏季、9, 10月を冬季のデータとし、 $\delta^{18}\text{O}$ を緯度に対してプロットした(図6)。また、できるだけ高緯度の降雪も考慮するために、2008年の昭和基地での降雪データも追加した。

図6より、南極海における降雪の $\delta^{18}\text{O}$ は、全般に、夏季に大きく冬季に小さい値をとることが明白であり、緯度分布にも季節変化があることがわかった。そこで、夏季と冬季における緯度分布の違いを考慮し、季節ごとに回帰直線を求めた。65°Sでは、昭和基地のデータを追加して、夏季は-9.4‰、冬季で-19.2‰になる。また、高緯度になるほど $\delta^{18}\text{O}$ が小さくなっており、 $\delta^{18}\text{O}$ の緯度傾度は、夏季は-0.83‰/°、冬季は-1.58‰/°となり、冬季の方が傾きが大きいことがわかった。

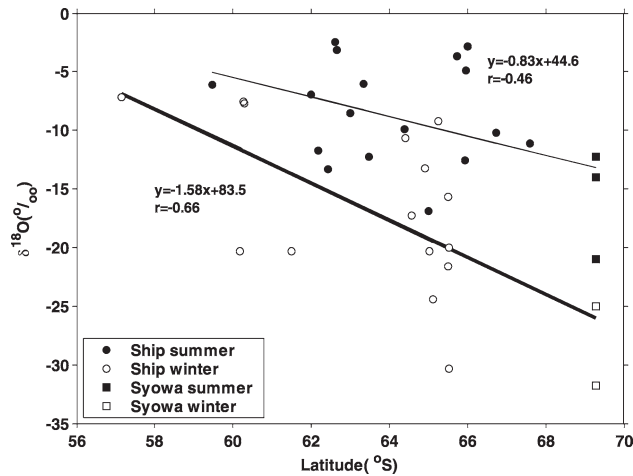


図6 南極海上における夏季と冬季の降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の緯度分布. 太実線は昭和基地の月平均値を考慮した夏季の回帰直線を示し, 細実線は同様に冬季の回帰直線を示す.

Fig. 6. Meridional distribution of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in summer and winter in the Antarctic Ocean. The bold solid line is the summer regression line and the thin solid line is the winter regression line based on monthly averages at Syowa Station.

5. 議 論

5.1. 昭和基地による降雪の $\delta^{18}\text{O}$ と気温の関係について

図5の結果から, $\delta^{18}\text{O}$ を気温で回帰したときの回帰直線の傾きとその95%信頼区間は1974年が 0.63 ± 0.47 , 2008年が 0.91 ± 0.40 となり, 傾きの値はやや違うものの有意差はない. 2008年には降雪イベントすべてをサンプリングしておらず, データの代表性に問題がある可能性も考えられる. しかしながら, 南極沿岸域にある昭和基地での降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の月平均値と月平均気温とに相関関係が認められ, 季節変動があることは改めて確認できた.

5.2. 降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の緯度分布の整合性

海上で得られたデータの代表性および既存データとの整合性を調べるために, 過去に取得された南半球の陸上で得られた季節平均および年平均の気候値(3年以上)データ(Fricke and O'Neil, 1999; Morgan, 1982)と重ねてプロットした(図7). $\delta^{18}\text{O}$ は, 低緯度から高緯度に向けて連続的な変化を示しているが, 低緯度($0\text{--}40^\circ\text{S}$)では変化が小さく, 高緯度($50\text{--}80^\circ\text{S}$)になると急激に低下している. これは, Fricke and O'Neil (1999)による北半球の緯度分布と比べても類似した傾向を示している. すなわち北半球でも, 北緯50度くらいから低下の傾きが急になり始め, 高緯度での傾きは大きい. このように, 今回求めた船上での降雪の $\delta^{18}\text{O}$ と昭和基地における降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の緯度分布については, 過去のデータとの半球規模での整合性および連続性が得られており, 今まで空白域であった南大洋上にデータを加えることができたと考えられる.

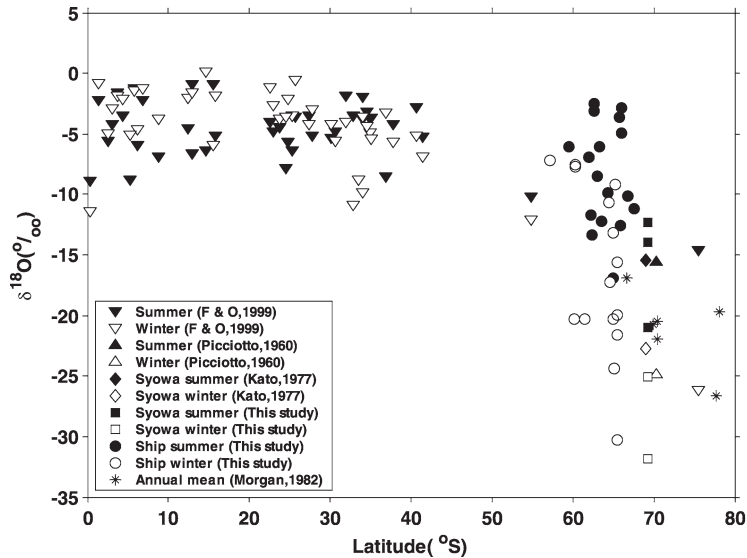


図7 南半球における降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の緯度分布
 \blacktriangledown ・ \triangleleft は Fricke and O'Neil (1999), \blacktriangle ・ \triangle は Picciotto *et al.* (1960), \blacklozenge ・ \diamond は Kato (1977) のそれぞれ夏季・冬季のデータ, * は Morgan (1982) の年平均のデータ.

Fig. 7. Meridional distribution of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in the Southern Hemisphere.
 The symbols \blacktriangledown ・ \triangleleft are the data adopted from Fricke and O'Neil (1999), \blacktriangle ・ \triangle from Picciotto *et al.* (1960), \blacklozenge ・ \diamond from Kato (1977) for summer and winter, respectively and * from Morgan (1982) for the annual mean.

5.3. 海洋への淡水供給の影響

一般に南極海の海洋表層では、下層から湧昇した周極深層水に表面からの降雪・氷床・海水起源の淡水が加わることで、水塊特性が決まっていると考えられる。淡水の塩分は起源によらずほぼ0であるが、 $\delta^{18}\text{O}$ はその起源によって異なり、海水1~2‰、降雪-13~-20‰、棚氷融解水(側面)-20~-35‰、棚氷融解水(底面)-35~-45‰となる(Jacobs *et al.*, 1985によるロス海での見積もり)。周極深層水(塩分は約34.7, $\delta^{18}\text{O}$ は約-0.03‰)がこれらの淡水と混合した場合、混合で生じた海水は低塩化し、かつそれぞれの $\delta^{18}\text{O}$ をもつ方向へと特性が変位する。ここでは、比較的外洋に位置する当該海域において、海洋表層の塩分- $\delta^{18}\text{O}$ 特性をもとに表面で流入した淡水の起源を推測し、図6で求めた降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 分布とどのように関係するかを考察する。

年間を通じた淡水流入の影響について考察するために、冬季水から周極深層水まで(70 m から 400 m 深)の層から得られた海水サンプルの塩分- $\delta^{18}\text{O}$ 特性を調べた。それより上層(70 m 以浅)の夏季季節躍層内では海水融解の影響が卓越するため、塩分と $\delta^{18}\text{O}$ の関係は基本的に融解-凍結ラインの上を移動する(Craig and Gordon, 1965)。しかしその下の冬季水層は冬季の鉛直混合の状況を反映するため、年間を通じた平均的な淡水流入の

影響をうけていると考えられる。一方、冬季水のもととなる海水エンドメンバーは周極深層水である。そこで、周極深層水から冬季水までの層にある海水について塩分と $\delta^{18}\text{O}$ の回帰直線を塩分 0 の切片まで外挿してやれば、表面から加わえられた淡水エンドメンバーの $\delta^{18}\text{O}$ が求まることになる。その回帰直線により求めた淡水エンドメンバーの $\delta^{18}\text{O}$ 値は $-16.9\% \pm 1.5\%$ (95% 信頼区間) になり (図 8), 図 6 より求められる平均的な緯度 65°S における降雪の夏季 (-9.4%) と冬季 (-19.2%) の $\delta^{18}\text{O}$ 値の平均的な値に位置づけられる。これにより、最も単純に考えた場合、この海域では、海洋表面に流入する淡水の主な起源は降雪で説明できる。

上記のようにして外挿により求められた淡水エンドメンバーの $\delta^{18}\text{O}$ は、氷山と海水による淡水フラックスが同程度に寄与したとしてもこの値になる。しかし、淡水フラックスの各過程に関する過去の研究をあわせて考えるとその可能性は低い。氷山の融解による淡水フラックスは、氷山の地理的な分布から、沿岸域と南極半島周辺の南極周極流域では顕著なものの、外洋域ではおおむね降雪 (一蒸発) の 20% 未満と見積もられている (Silva *et al.*, 2006)。海水による淡水フラックスの影響は、海水の生成と融解の両方を考慮せねばならず評価は困難であるが、氷山の影響が小さいとすれば海水だけでこの値を説明することはできない。このように、 $\delta^{18}\text{O}$ による解析は淡水フラックスに関する既存の研究の妥当性を確認する有効な制約となりうると考えられるが、特に海水の動態をはじめとして、それぞれの淡水過程に関する直接評価の定量性を高めることがもとより重要である。

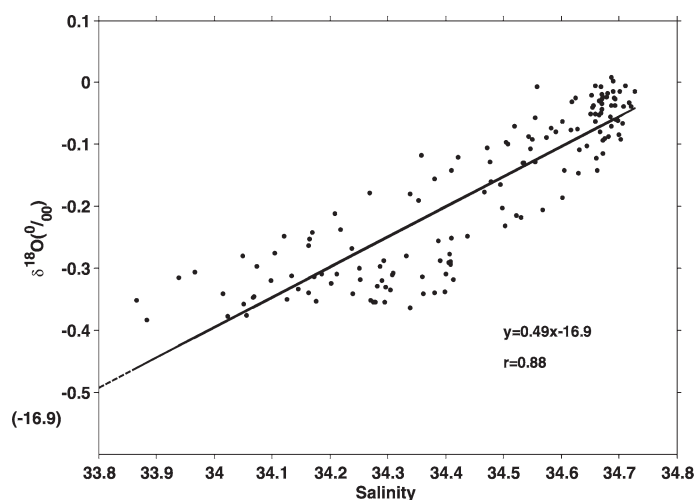


図 8 観測海域 (図 1) で得られた海洋表層 (周極深層水と南極冬季水の間) における海水の塩分と $\delta^{18}\text{O}$ の関係

Fig. 8. Relationship between salinity and $\delta^{18}\text{O}$ of near surface sea water (between the Circumpolar Deep Water and the Antarctic Winter Water) in the region where observations were taken (Fig. 1.).

6. ま と め

従来データの空白域であった南大洋上及び沿岸域での夏季・冬季における降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の緯度分布を調査した。降雪の $\delta^{18}\text{O}$ は、夏季に高く冬季に低い二つの季節モードに分けられる。高緯度に向けて減少する緯度分布を示し、低緯度で減少の程度が少なく、高緯度に行くほど急激な低下がみられた。また夏季よりも冬季の方がその傾度の低下が大きいことがわかった。インド洋セクターの南緯 65 度付近において、上記より得られた降雪の $\delta^{18}\text{O}$ は海洋表層の塩分— $\delta^{18}\text{O}$ 特性から推定される淡水エンドメンバーの $\delta^{18}\text{O}$ 値 (−17‰ 程度) とよく対応した。

このように、海洋の塩分変化を考察する上で、降雪の $\delta^{18}\text{O}$ を測定分析する手法が有効であることが確認できた。ただし、地理的な拡がり比べて実際に取得した降雪 $\delta^{18}\text{O}$ のデータ数が少ないことから、今後は、空間的にも時間的にもデータを増やしていくことが重要であると考えられる。

文 献

- Aoki, S., Rintoul, S.R., Ushio, S., Watanabe, S. and Bindoff, N.L. (2005): Freshening of the Adélie Land Bottom Water near 140°E. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23601, doi:10.1029/2005GL024246.
- Bindoff, N.L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J.M., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C.K., Talley, L.D. and Unnikrishnan, A. (2007): Observations: oceanic climate change and sea level. *Climate change 2007: the physical science basis*, ed. by S. Solomon [*et al.*]. Cambridge, Cambridge University Press., 385–432.
- Craig, H. (1961): Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science*, **133**, 1833–1834, doi:10.1126/science.133.3467.1833.
- Craig, H. and Gordon, L.I. (1965): Isotopic oceanography: deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere. *Proceedings of the symposium on marine geochemistry*, [ed. by] Schink D.R. and Coreless J.T. Kingston, University of Rhode Island., 277–374 (Occasional Publication 3).
- Eicken, H., Lange, M.A., Hubberten, H.-W. and Wadhams, P. (1994): Characteristics and distribution patterns of snow and meteoric ice in the Weddell Sea and their contribution to the mass balance of sea ice. *Ann. Geophys. A-Upper.*, **12**, 80–93, doi:10.1007/s00585-994-0080-x.
- Fricke, H.C. and O'Neil, J.R. (1999): The correlation between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time. *Earth Planet. SC Lett.*, **170**, 181–196.
- Heywood, K.J., Locarnini, R.A., Frew, R.D., Dennis, P.F. and King, B.A. (1998): Transport and water masses of the Antarctic Slope Front system in the eastern Weddell Sea. *Ocean, ice and atmosphere: interactions at Antarctic continental margin*, [ed. by] S.S. Jacobs and R.F. Weiss. Washington, D.C., American Geophysical Union, 203–213 (Antarc. Res. Ser. 75).
- Jacobs, S.S., Fairbanks, R.G. and Horibe, Y. (1985): Origin and evolution of water masses near the Antarctic continental margin: evidence from $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ ratios in seawater. *Oceanology of the Antarctic continental shelf*, [ed. by] S.S. Jacobs. Washington, D.C., American Geophysical Union, 59–85 (Antarc. Res. Ser. 43).
- Jacobs, S.S., Giulivi, C.F. and Mele, P.A. (2002): Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science*, **297**, 386–389, doi:10.1126/science.1069574.
- Kato, K. (1977): Oxygen isotopic composition and gross β -radioactivity in firn. *JARE Data Rep.*, **36** (Glaciology), 158–169.
- Kato, K. (1978): Factors controlling oxygen isotopic composition of fallen snow in Antarctica.

Nature, **272**, 46-48.

加藤喜久雄 (1979): 南極における降雪の酸素同位体組成. 南極資料, **67**, 124-135.

加藤喜久雄・渡辺興亜・佐藤和秀 (1979): みずほ高原の飛雪の酸素同位体組成と沿岸低気圧による水蒸気輸送. 南極資料, **67**, 136-151.

Mayewski, P.A., Meredith, M.P., Summerhayes, C.P., Turner, J., Worby, A., Barrett, P.J., Casassa, G., Bertler, N.A.N., Bracegirdle, T., Naveira-Garabato, A.C., Bromwich, D., Campbell, H., Hamilton, G.H., Lyons, W.B., Maasch, K.A., Aoki, S., Xiao, C. and Ommen T.V. (2009): State of the Antarctic and Southern Ocean climate system. *Rev. Geophys.*, **47**, RG1003, doi:10.1029/2007RG000231.

Morgan, V.I. (1982): Antarctic ice sheet surface oxygen isotope values. *J. Glaciol.* **28**, 315-323.

Picciotto, E., De Maere, X. and Friedman, I. (1960): Isotopic composition and temperature of formation of antarctic snows. *Nature*, **187**, 857-859, doi:10.1038/187857a0.

Schwarz, G., Ohm, K., Yamanouchi, T., Furukawa, T., Kowski, P. and Gernandt, H. (1996): Stable Isotopic Composition of Antarctic Air Moisture and Precipitation. *Nankyoku Shiryô*, (Antarc. Rec.), **40**, 169-178.

Silva, T.A.M., Bigg, G.R. and Nicholls, K.W. (2006): Contribution of giant icebergs to the Southern Ocean freshwater flux. *J. Geophys. Res.*, **111**, C03004, doi:10.1029/2004JC002843.

Uemura, R., Matsui, Y., Yoshimura, K., Motoyama, H. and Yoshida, N. (2008): Evidence of deuterium excess in water vapor as an indicator of ocean surface conditions. *J. Geophys. Res.*, **113**, D19114, doi:10.1029/2008JD010209.