

## 南極みずほ高原の雪の酸素同位体組成

加藤喜久雄\*・渡辺興亜\*\*・佐藤和秀\*\*\*

### Oxygen Isotopic Composition of Snow on Mizuho Plateau, Antarctica

Kikuo KATO\*, Okitsugu WATANABE\*\* and Kazuhide SATOW\*\*\*

**Abstract:** Oxygen isotopic composition of snow samples taken on different dates at Syowa Station and Mizuho Camp, and at various stations during the traverses of the 15th Japanese Antarctic Research Expedition in 1974–1975 was determined. Daily variation of oxygen isotopic composition of snow at Syowa Station is caused mainly by the supply of  $^{18}\text{O}$ -rich water vapor on account of the approach of a depression. Seasonal variation of oxygen isotopic composition of snow at Syowa Station and Mizuho Camp is not always controlled only by the temperature of formation of the snow. An anomaly in oxygen isotopic composition of snow sampled at the stations along the traverse routes was found. The area where the anomaly was found is considered to be the boundary between the spheres of influence of Antarctic high and coastal low atmospheric pressure.

**要旨:** 昭和基地およびみずほ観測拠点における降雪および飛雪と、内陸トラバースルートに沿った地点での雪、2mピットの雪について、酸素同位体組成を測定し、それが何により規制されているか検討した。昭和基地における雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動は、沿岸低気圧によりもたらされる水蒸気の吹き込みとよく相関している。雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の季節変化は、昭和基地においてもみずほ観測拠点においても、気温の変化のみによって規制されていない。トラバースルートに沿った地点で採取した雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値に、著しい増大が見られる地域が見出された。この地域は、沿岸低気圧と南極高気圧が大きく影響している二つの気候区の境に当たり、この境は季節により変化しているものと考えられる。

#### 1. はじめに

南極氷床には、海から蒸発した水蒸気が、大気の運動により運ばれ、降雪ないしは凝結によって氷床表面に付け加わり、水が固体として保持される。氷床氷となった水は、数千～数

\* 名古屋大学水圏科学研究所. Water Research Institute, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464.

\*\* 国立防災科学技術センター雪害実験研究所. Institute of Snow and Ice Studies, National Research Center for Disaster Prevention, Suyoshi-cho, Nagaoka 940.

\*\*\* 京都大学防災研究所. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji 611.

万年の経過を経て、氷床の末端から海へ入り、再び液体の水に戻る。このような水の循環過程で、南極氷床への水蒸気の輸送機構とその供給源を知ること、および加藤・渡辺（1977）がボーリングコアの酸素同位体組成に関する研究において指摘した、雪面および表面積雪層形成過程における雪の酸素同位体組成とその変化を知ることが目的に本研究を行った。

みずほ高原（図1）における雪の同位体組成に関する組織的研究は、今日までなされていない。水循環の観点からのみずほ高原の接地および上空大気の構造、水蒸気の氷床上への輸送機構についての研究も、小林（1975）以外にほとんど行われていない。そこで昭和基地およびみずほ観測拠点（標高2,230 m）における降雪と地吹雪によってもたらされる雪、なら

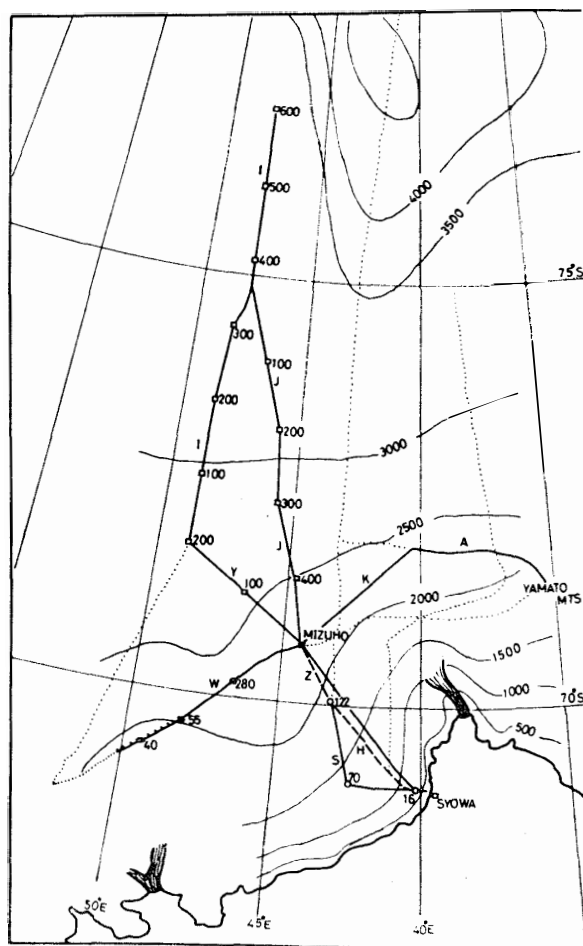


図1 第15次日本南極地域観測隊（1974年～1975年）のみずほ高原におけるトラバースルート

Fig. 1. Route map of traverses of the 15th Japanese Antarctic Research Expedition in Mizuho Plateau, East Antarctica in 1974-1975.

びに内陸トラバースルート (図1) 上の観測ステーションでの飛雪および積雪, さらに2 m ピットの雪を採取し (KATO, 1977), それらについて酸素同位体組成を求め, その結果について検討するとともに, これらの水蒸気が海洋から氷床にもたらされる過程について考察した.

## 2. 試料と酸素同位体組成の測定法

昭和基地およびみずほ観測拠点 (図1) における, 降雪と地吹雪によりもたらされる雪を1974年1月~1975年2月に採取した. 第15次日本南極地域観測隊は1974年~1975年にわたる内陸トラバースルート (図1) 上の観測ステーションで, 飛雪および積雪と2 m ピットの雪を採取した. これらの雪はポリビンに入れ, 冷凍状態で名古屋大学水圏科学研究所の冷凍室まで輸送された. 酸素同位体組成の測定の直前に溶かして測定を行った. 酸素同位体組成は, EPSTEIN and MAYEDA (1953) の方法を一部修正した方法で測定した. 試料水と25°Cで酸素同位体平衡にした炭酸ガスの $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を, 名古屋大学理学部地球科学教室のVarian Mat CH-7質量分析計を用いて測定した. 測定結果は次式のように, 標準海水 (SMOW; CRAIG, 1961) からの $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比の千分偏差 (‰) で表す.

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{試料}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{標準海水}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{標準海水}}} \times 1,000$$

測定誤差は $\pm 0.2\%$ である. 試料の採取地点および採取年月日とその $\delta^{18}\text{O}$ 値は別にKATO (1977) が報告している.

## 3. 結果と考察

図2に昭和基地とみずほ観測拠点における7月, 8月の雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値と, 日平均気温, 日平均気圧を示した. 昭和基地とみずほ観測拠点において, 日平均気温および日平均気圧の変動はよく相関している. 村越 (1959) が報告しているように, 気圧, 風速, 気温の三者の間には密接な関係があり, 南極氷床の沿岸に低気圧が接近するとともに, 接地大気気圧が下がり, ブリザードの吹き出しにより逆転層が破壊され, 地表の冷気が上層の暖気と混合して気温が上昇するのが一般である. とくに, ブリザードの吹き出しに伴って, 気温が上昇する現象は常に認められている. 昭和基地の雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値は, 低気圧がきて気温が上がると大きくなり, 低気圧が去り気温が下がると小さくなっている. しかし1,000 mb以上でブリザードが吹き出し, 気温の上がった8月2日の雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値は大きくなっていない. このことは

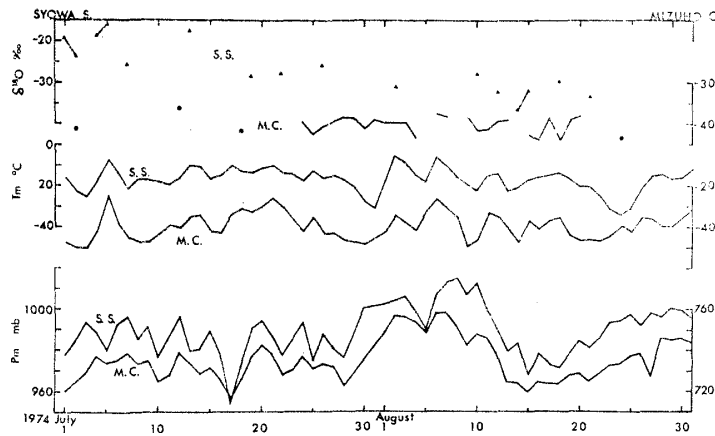


図 2 南極昭和基地とみずほ観測拠点における 1974 年 7 月～8 月の雪の酸素同位体組成 ( $\delta^{18}\text{O}$ ), 日平均気温 ( $T_m$ ), 日平均気圧 ( $P_m$ )

Fig. 2. Oxygen isotopic composition of snow ( $\delta^{18}\text{O}$ ), daily mean temperature ( $T_m$ ) and daily mean pressure at station level ( $P_m$ ) in July–August 1974 at Syowa Station and Mizuho Camp, East Antarctica.

昭和基地にもたらされる降雪および飛雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値が、雪の生成温度を反映しているのではなく、低気圧による海側からの  $^{18}\text{O}$  に富んだ水蒸気の供給により大きくなっていることを示している。一方、みずほ観測拠点の雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値は、気温との間に明白な関連性はなく、気温の変動に対する  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動は昭和基地に比べ小さくなっている。このことは、みずほ観測拠点の雪が降雪の他に、定常的に吹いているカタバ風により運ばれる飛雪を多量に含んでいることによると考えられる。

昭和基地およびみずほ観測拠点における、1974 年 1 月～1974 年 12 月にわたる雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値と月平均気温を図 3 に示した。雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動と月平均気温の変動との関連性は、昭

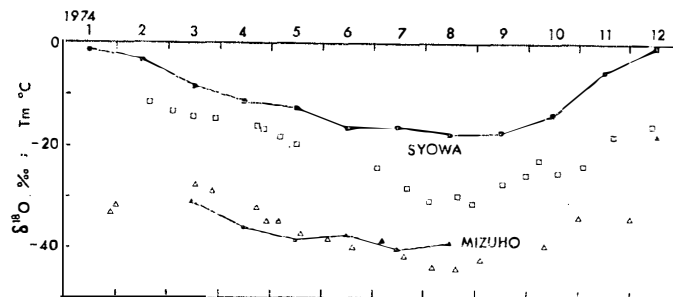


図 3 南極昭和基地とみずほ観測拠点における 1974 年の雪の酸素同位体組成 ( $\delta^{18}\text{O}$ , □, △), 月平均気温 ( $T_m$ , ●, ▲)

Fig. 3. Oxygen isotopic composition of snow ( $\delta^{18}\text{O}$ , □, △) and monthly mean temperature ( $T_m$ , ●, ▲) in 1974 at Syowa Station and Mizuho Camp, East Antarctica.

和基地においてもみずほ観測拠点においてもほぼ同じである。雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動は、降雪の生成温度により規制された季節変化を示すものであるが、両地点の雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動は、月平均気温に一月ほど遅れた変動を示している。これは、地上の気温変化が上層の大気の温度変化をもたらすのに、それぐらいの時間が必要であることによるのであろう。この両者間の変動のずれを考慮に入れても、2月から6月の雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値は大きすぎる。これは、それ以外の月に比べ、低気圧によりもたらされる水蒸気の  $\delta^{18}\text{O}$  値がより大きいことに基因すると考えられる。このことは2月～6月に南極海が海水により占められる面積が、小さくなることと関連づけられることである。

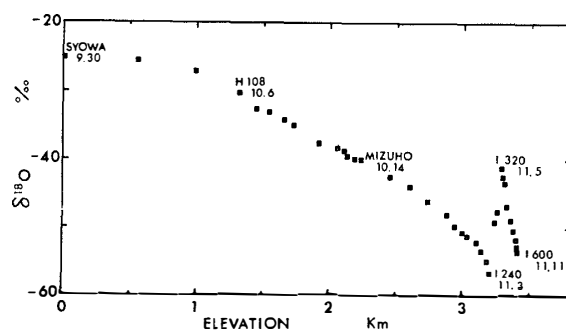


図4 1974年9月30日～11月11日のトラバースルート S-H-Z-Y-I に沿った観測地点における雪の酸素同位体組成 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) と高度

Fig. 4. Oxygen isotopic composition of snow ( $\delta^{18}\text{O}$ ) and elevation at the stations along the traverse route S-H-Z-Y-I in September 30 to November 11, 1974.

内陸トラバースルート上の観測地点で採取した雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値と高度との関係を図4に示した。高度約1,000 mまでは雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値はほぼ一様である。高度約1,000 m～2,700 mの間では、高度が大きくなるにつれ雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値はほぼ直線的に小さくなっている。高度約2,700 mを越すと、高度による雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の減少はより大きくなる。ところが高度3,200 m付近で内陸にわずかに入るだけで、雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値が16‰も大きくなる場所が見出された。これらの地点で雪を採取した11月初めは、昭和基地では安定な気象条件下にあったのだが、現地はその期間に8°Cの気温の上昇と降雪が見られた。しかし、図2からわかるように、8°Cの気温上昇のみでは、雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の16‰の増大は説明できない。この理由を知るため、雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値と採取地点の高度、10 m 雪温、2 m ピットの雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値との関連について検討した。図5に、これらについてのみずほ観測拠点からの距離との関係を示した。年平均気温を与えるといわれる10 m 雪温と2 m ピットの雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値に、雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値に著しい増大の見られる地域をさかいに不連続な変化が認められる。しかし、このことによって雪の

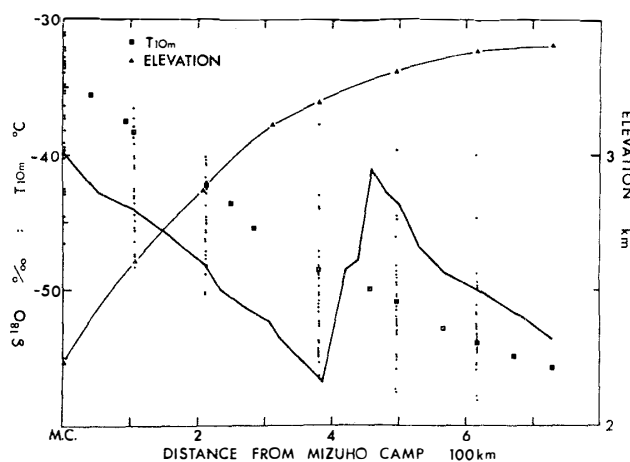


図 5 1974年10月14日～11月11日のトラバースルート Y-I に沿った観測地点における雪および2 m ピットの雪の酸素同位体組成 ( $\delta^{18}\text{O}$ ), 10 m 雪温 ( $T_{10\text{m}}$ ), 高度

Fig. 5. Oxygen isotopic composition of snow and firn layer in 2 m pits ( $\delta^{18}\text{O}$ ), firn temperature at 10 m depth ( $T_{10\text{m}}$ ) and elevation at the stations along the traverse route Y-I in October 14 to November 11, 1974.

$\delta^{18}\text{O}$  値の著しい増大は説明されえない。注目すべきことは、この地域で雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値と 2 m ピットの雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値との関係が大きく変っていることである。10月14日から11月11日までの雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値が、みずほ観測拠点から I 240 までの間では、2 m ピットの雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動幅の小さい方に入るのに、一方雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値が著しく増大した後の I 320 より内陸においては、2 m ピットの雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動幅の大きい方に入っていて、全く逆の関係を示している。以上のことから次のように考えることができるであろう。

1974年11月初旬には、I 240 までは昭和基地やみずほ観測拠点と同じ沿岸低気圧の勢力圏にある。他方 I 320 より内陸は南極高気圧の勢力圏にあって、海から供給された水蒸気が南極沿岸低気圧地域の上空を通過して供給され、高気圧圏内を下降した水蒸気はカタバ風により沿岸低気圧地帯へ送られる。したがって、南極高気圧地域と沿岸低気圧地域に供給される水蒸気は、その供給源、輸送機構を異にし、これらの二つの気候区を境にして、雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値は不連続に変化する。しかもその変化は、内陸側へ向けて増大することになる。高気圧圏内では下降気流による温度上昇が起こり、逆転層の強さが、低気圧圏内におけるより強くなっているものと考えられる。このことは、I 320 における降雪の生成温度が、I 240 における降雪の生成温度より高いことを意味し、I 240 から I 320 へかけての雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の増大を一層大きくすることになる。また、南極高気圧圏内では、降雪の生成温度と地表の気温との差

が低気圧圏内におけるより大きく、氷床上では降雪から氷床上の雪への水蒸気の移動が起こる。したがって積雪の霜ざらめ化が進み、降雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値はより大きくなり、氷床上の雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値はより小さくなる。このような現象が起こっていても二つの気候区の境が一定のところにあるなら、2 m ピットの雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動幅に対する雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の位置関係は、各気候区内において大きく変動することはない。しかし、二つの気候区の境が季節により変化しているならば、このような現象のため、その境界領域では各気候区内におけるより 2 m ピットの雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動幅は大きくなる。また 2 m ピットの雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動幅に対する雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の位置関係も、変化しつつある両気候区の境で大きく異なってくる。

このように、雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値に著しい増大のみられる地域は、沿岸低気圧と南極高気圧が大きく影響している二つの気候区の境に当たり、この境は季節により変化しているものと考えられる。このことは、これらの地域を境に、カタバ風の風向、風速が不連続に変ること、雪面の形態に変化が認められること、積雪の霜ざらめ化の度合に差異が認められること、などの事実とよく一致している。

#### 4. ま と め

昭和基地およびみずほ観測拠点における、降雪および飛雪と内陸トラバースルートに沿った地点での雪、2 m ピットの雪について、酸素同位体組成を測定し、それが何により規制されているかを検討した。昭和基地における雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動は、沿岸低気圧によりもたらされる水蒸気の吹き込みとよく相関している。雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の季節変化は、昭和基地においてもみずほ観測拠点においても、気温の変化に一カ月ほど遅れた変動を示す。それでも 2 月から 6 月の雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値は大きすぎる。このことは、夏に南極海が海氷により占められる面積が小さくなることにより、2 月～6 月に低気圧によりもたらされる水蒸気の  $\delta^{18}\text{O}$  値がそれ以外の月に比し、より大きいことに基因すると考えられる。トラバースルートに沿った地点で採取した雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値は、高度 1,000 m ぐらいまではほぼ一様、1,000～2,700 m ぐらいの間では、高度が大きくなるにつれ雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値は直線的に小さくなる。高度 2,700 m ぐらい以上では、高度による雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値の減少はより大きくなっているが、高度 3,200 m 付近では雪の  $\delta^{18}\text{O}$  値に著しい増大が見られる地域が見出された。この地域は、沿岸低気圧と南極高気圧が大きく影響している二つの気候区の境に当たり、この境は季節により変化しているものと考えられる。

なお、本研究にあたり、酸素同位体組成の測定にご協力をいただいた名古屋大学理学部の

小穴進也, 中井信之, 水谷義彦の各氏および適切な助言をいただいた名古屋大学水圏科学研究所の樋口敬二, 北野康の両氏に心から感謝の意を表します。

#### 文 献

- CRAIG, H. (1961): Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science*, **133**, 1833–1834.
- EPSTEIN, S. and MAYEDA, T. (1953): Variation of  $O^{18}$  content of water from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4**, 213–224.
- KATO, K. (1977): Oxygen isotopic composition and gross  $\beta$ -radioactivity in firn. *JARE Data Rep.*, **36** (Glaciol.), 158–169.
- 加藤喜久雄・渡辺興亜 (1977): 南極みずほ高原からえた浅層ボーリングコア中の酸素同位体の分布. *南極資料*, **58**, 254–262.
- 小林俊一 (1975): 第14次南極地域観測に参加して—南極における接地層研究—. *天気*, **22**, 3–7.
- 村越 望 (1959): 第1次越冬隊気象部門報告 (その2). *南極資料*, **6**, 22–33.