

南極みずほ基地における飛雪の酸素同位体組成の
年変化と積雪層の同位体組成

上 田 豊*

Annual Variation of Oxygen Isotopic Contents of Drifting Snow and the Isotopic
Contents of Deposited Snow Layers at Mizuho Station, Antarctica

Yutaka AGETA *

Abstract : Oxygen isotopic contents of fresh snow drifts in the katabatic wind zone were measured. The samples were collected at a stage before forming deposited snow layers throughout the year. Besides, the oxygen isotope profiles of deposited snow layers at the same place were obtained. The $\delta^{18}\text{O}$ contents of the snow drifts had high values in summer ($-30\sim-40\text{‰}$); in winter, values were generally low (above -50‰) but sometimes there were high values similar to those in summer. Deviation of relations between air temperature at sampling time and $\delta^{18}\text{O}$ contents of the snow drifts under different weather conditions is discussed. Vertical profiles of $\delta^{18}\text{O}$ contents of deposited snow are supposed to show a wide annual range and complicated annual variation, if such snow drifts accumulated continuously. However, those of deposited snow actually seen in the surface layers usually show a narrow range ($-35\sim-45\text{‰}$) and simplified pattern. Positions of maxima and minima in $\delta^{18}\text{O}$ profiles of deposited snow have good correlations with layering of ice crusts which were formed during hiatus periods of snow deposition. These results indicate the importance of change of the isotopic contents after snow deposition for understanding the isotope profiles of deposited snow.

要旨: 南極の斜面下降風域で、積雪層を形成する前段階の新しいドリフトの試料をほぼ1年間にわたって採取し、それらの酸素同位体組成を測定した。また、同地点の積雪層の同位体プロファイルも得られた。ドリフトの $\delta^{18}\text{O}$ 値は、夏に高く($-30\sim-40\text{‰}$)、冬は -50‰ 近くまで下がる場合があるが、時々夏なみに高かった。 $\delta^{18}\text{O}$ 値と試料採取時の気温との関係はばらつき、試料の起源の相違のためか、採取時の気象状態によってずれた。もしこれらのドリフトが連続的に堆積すれば、積雪層の $\delta^{18}\text{O}$ 値の鉛直プロファイルも広い幅で複雑な変化をするはずだが、実際は $-35\sim-45\text{‰}$ の範囲で単調に変化する。このプロファイルの極大・極小位置は、堆積中断で形成された氷板の分布と良い相関がある。これらの結果は、雪の同位体組成の堆積後の変化が、積雪の同位体プロファイルの理解に重要なことを示している。

1. ま え が き

南極氷床の表層積雪は地域によって異なった堆積環境下にあり、積雪層中の酸素同位体組

* 名古屋大学水圏科学研究所. Water Research Institute, Nagoya University, Nagoya 464-01.

成 ($\delta^{18}\text{O}$) のプロファイルも異なった特徴をもつ (SATOW and WATANABE, 1985; WATANABE *et al.*, 1988; 上田ら, 1991; 上田・神山, 1991). そして, 斜面下降風が強い地域では, 地ふぶきによる堆積-削はくや積雪のしもざらめ化などによる堆積後の同位体組成の変化のため, その積雪におけるプロファイルは季節による変化を示さないことが知られている. それなら, この積雪を構成している堆積前の雪の同位体組成の実態は, どうなっているのだろうか.

第26次南極地域観測隊の越冬中, 斜面下降風域にあるみずほ基地 (70.7°S, 44.3°E, 高度2230m) において, 積雪層を形成する前段階である飛雪試料をほぼ1年間にわたって採取できた. 本稿では, 積雪層中にとりこまれていない段階の雪の酸素同位体組成の年間の変化と気象条件との関係について述べるとともに, 同基地の積雪層の同位体プロファイルの分布と層構造との関係についても報告する.

2. 年間試料の採取方法

試料は, 飛雪や降雪による新しいドリフトより, 1985年2月11日から1986年1月11日にかけて, それらが形成された計139回について採取された. 採取の対象となったドリフトには, 雪面下にあるみずほ基地施設への入口付近にできた一時的な小さいドリフトと, 基地内での造水用採雪のための掘削孔によって雪面上の飛雪を落下させて人工的にためたドリフトがある. 両者からほぼ同時に採取された試料の $\delta^{18}\text{O}$ 値には, 顕著な差はなかった. これらの試料の $\delta^{18}\text{O}$ 値は, 帰国後, 名古屋大学水圏科学研究所の質量分析装置MAT250によって測定した.

3. ドリフトの酸素同位体組成の年間の変化

図1に, 試料の $\delta^{18}\text{O}$ 値を採取時の気象状態 (1: 降雪のみ, 2: ふぶき, 3: 高い地ふぶきまたはふぶき, 4: 低い地ふぶき-降雪なし) で区別して示した. 試料には, その場で空から降ってきた雪粒と, 風上 (斜面上流) から地ふぶきで運ばれてきた雪粒 (drifting snow, blowing snow) がある. 1は前者のみ, 2は前者と後者の混合, 3は後者に前者が混合しているかが視程が悪く確認できなかった場合, 4は後者のみの場合である. つまり, 前者は1と2, 場合によっては3に含まれ, 後者は地ふぶきをおこす風がある2, 3, 4の場合に含まれる. 図1には, みずほ基地の日平均気温の推移も参考のため示してある.

図1から, 試料の $\delta^{18}\text{O}$ 値について以下のことがわかる.

- (1) 年間, 最高 -30‰ から最低 -50‰ 程度の値をもちながら, 不規則に変化する.
- (2) 10~3月の夏を中心とする半年間は -40‰ 程度以上で 10‰ 以内の幅で変化するが, 4月~9月の冬を中心とする半年間には -50‰ 近くまで下がる場合がある.
- (3) 4月の変化幅はとくに大きく, 年間の変化幅と同様の 20‰ 近くにおよぶ.

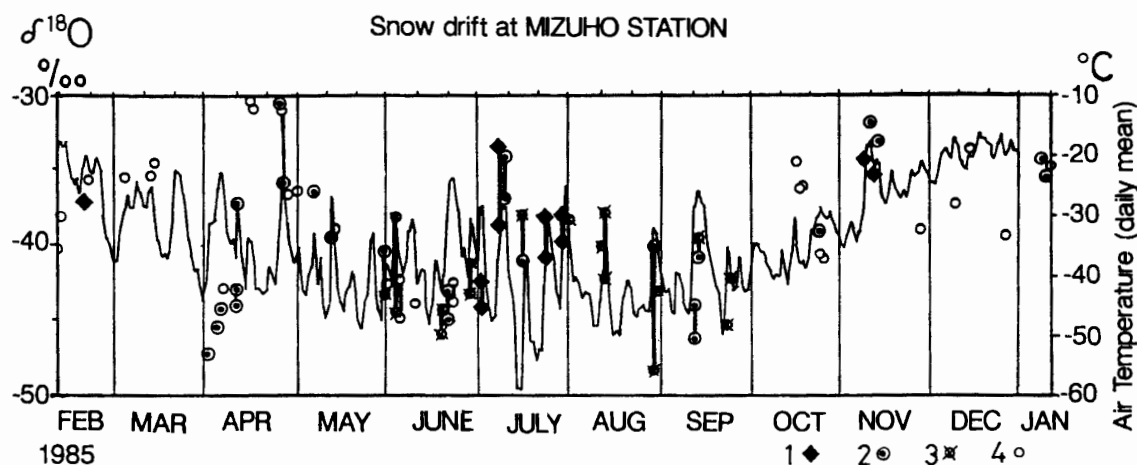


図1 みずほ基地のドリフトの酸素同位体組成（記号）と同基地の日平均気温の年変化（細い実線）。（1985年2月～1986年1月）

（1：降雪のみ，2：ふぶき，3：高い地ふぶきまたはふぶき，4：低い地ふぶき-降雪なし．たて棒：同じ日の採取時刻の違いによる変化の範囲）

Fig. 1. Annual variations of oxygen isotopic contents of snow drifts (symbols) and daily mean air temperature at Mizuho Station (thin solid line). (February 1985-January 1986)

(1: snowfall only, 2: snow storm, 3: blowing snow or snow storm, 4: drifting snow-without snowfall. Vertical bar: range of daily variation of the isotopic contents.)

(4) 厳寒期の7月に，日平均気温の上昇すなわち暖気の流入にともなう降雪を含む試料が，夏なみの高い値をもつ場合がある。

(5) 同じ日でも採取時刻のちがいによって最大 10‰ 近い幅の日変化（図中：太いたて線）がある。

雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値は，大気中で降雪が形成される時の温度と密接に関係するので，降雪が年間十分な量をもって規則的に堆積し融解のない所では，積雪層の $\delta^{18}\text{O}$ 値の鉛直プロファイルは気温の年変化に応じて年間1周期の変化をする。このことにより，極地域の比較的降雪量の多い所では，積雪の年層識別に $\delta^{18}\text{O}$ 値が有効に使われている。みずほ基地の場合も，日平均気温の短期日の上下はあるものの，気温変化の大きな傾向は年1周期である（図1）。

しかし， $\delta^{18}\text{O}$ 値については，もしかりに図1の雪試料がそのまま時間の推移とともに堆積し，堆積後の $\delta^{18}\text{O}$ 値が変化しないものと仮定すると，各時期の積雪量と試料1個当たりの厚さ次第であるが，年間の積雪量の鉛直プロファイルは複数の周期をもちうることになる。

ここで，図1で示した $\delta^{18}\text{O}$ 値と気温との関係をより詳しく検討してみる。図2は，図1で参考にした日平均気温ではなく，試料採取時の気温に対して $\delta^{18}\text{O}$ 値をプロットしてある。図中，2本の破線ではさまれた範囲は，降雪を含む試料（上記1，2）の結果の分布範囲である。図2から，結果のばらつきは全体に大きい，以下の傾向がみられる。

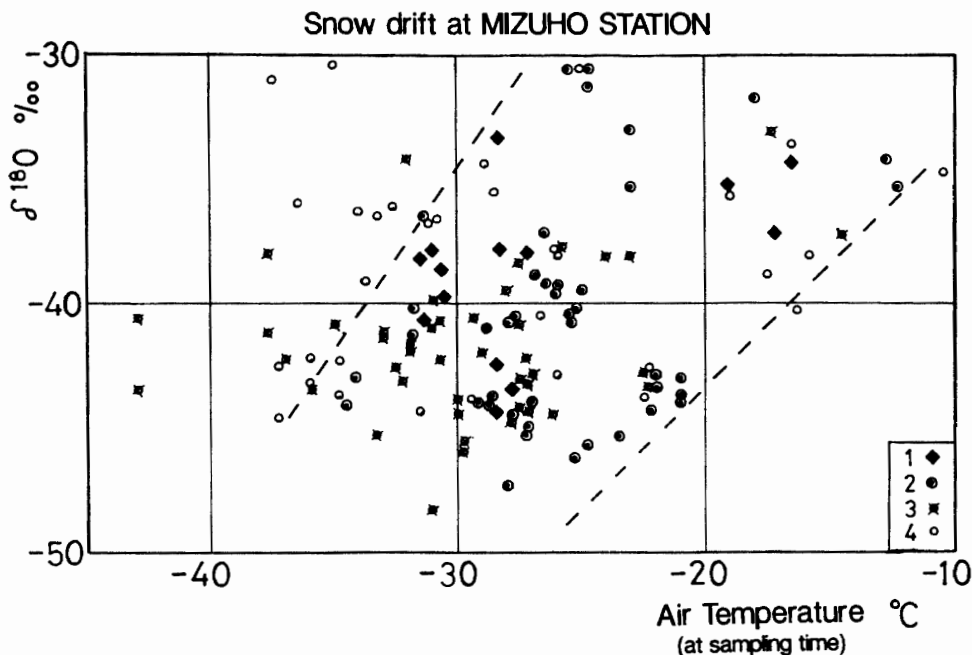


図2 みずほ基地のドリフトの酸素同位体組成と試料採取時の同基地の気温(1985年2月～1986年1月)

(1～4: 図1に同じ. 破線: 降雪がある場合(1, 2)の分布範囲)

Fig. 2. Oxygen isotopic contents of snow drifts and air temperature at sampling times at Mizuho Station (February 1985–January 1986).

(1–4: same as Fig. 1. Dashed line: range of the distribution in the case of 1 and 2.)

- a. 降雪のみ(上記1)の場合の結果は、図中・横方向の気温のばらつきが、他の場合に比較して小さい。
- b. ふぶき(上記2)の場合の結果は、降雪のみの場合にくらべて、同じ $\delta^{18}\text{O}$ 値でも図中・右方向の高温域まで分布する。
- c. 降雪なし(上記4)の場合の結果は、降雪を含む試料(破線の範囲)より図中・左方向の低温域まで分布する。

傾向aは、試料の起源(水蒸気が雪になった場所と時刻)が他の試料よりも限定されるので、妥当と考えられる。傾向bは、試料に含まれているその場の降雪以外の雪粒が、低温な上流部で降雪としてもたらされ、地ふぶきで運ばれて、より高温なみずほ基地で採取されたためとみることもできる。また傾向cは、降雪後採取されるまでに時間が経過しているため、昇華によって雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値が高くなった場合(図中・上方向へシフト)にありうる。ただし傾向b, cについては、試料の起源が同定できないため、確定的なことはいえない。

このように、個々のドリフトの $\delta^{18}\text{O}$ 値と季節や温度条件との関係は、単純ではない。しかし、試料と気象条件の適切なグループ分けをしてそれぞれの平均的傾向をみれば、両者に

良い相関がえられる可能性はあると考えられる。

4. 雪尺列に沿った積雪層の酸素同位体組成の分布

みずほ基地には、卓越風向にほぼ直交した1 m 間隔の101本の雪尺列があり、1972年以降、それらの雪面からの高さが測定されている。本研究のドリフト試料が採取された1985年の9月2～6日に、この雪尺列の中央部10本の風下約50 cmに深さ1 mの観測断面をトレンチを掘ってつくり、各々の雪尺の風下位置から深さ3 cm 間隔で連続して積雪試料を採取した。

図3の太い折れ線は、これらの試料の $\delta^{18}\text{O}$ 値を示す。図中の位置番号(Station No.)は、1, 2, …10がそれぞれ雪尺No.51, 152, …160にあたり、一直線上で互いに1 m ずつ離れている。図中両側の1～13の番号は、採取時の表面(積雪の深さ0 cm)に対する毎年夏の表面の相対位置で、1が1984/85年夏、以降は1年ずつさかのぼった夏面で、13が1972/73年の夏にあたる。これらの表面位置は、雪尺測定値(NATIONAL INSTITUTE OF POLAR RESEARCH, 1975–1987)から得たもので、7(1978/79夏)と10(1975/76夏)は欠測のため抜けている。奇数番号と偶数番号の年には、それぞれ細い破線と実線が1年ごとに交互に用いられ、それらの水平部が各々の雪尺から得られた年々の表面位置を示す。

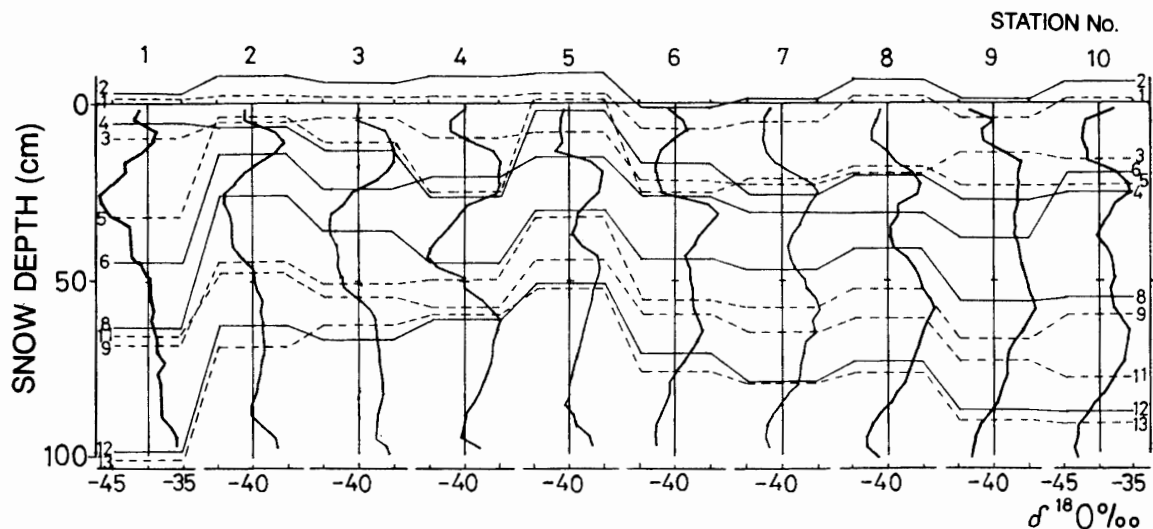


図3 みずほ基地雪尺列(1 m 間隔)に沿った積雪断面の酸素同位体組成の分布(太い実線)と年ごとの夏の表面の1985年8月末の表面(深さ0 cm)に対する相対位置(細い実線と破線)。

(1～13: 1984/85年夏～1972/73年夏)

Fig. 3. Distribution of oxygen isotopic contents at the cross section of deposited snow (thick solid line) along a snow stakes line (1 m interval) at Mizuho Station and the relative level of a summer surface in each year against the surface (0 cm depth) at the end of August 1985 (thin solid and dashed lines).

(1～13: 1984/85 summer～1972/73 summer)

これら 10 本の雪尺の 1973–85 年の積雪の年当たりの平均深さは 6.3 cm (水当量 2.7 cm) で、試料採取間隔が 3.0cm であるから、年間平均 2 個の試料を得たことになる (上田ら, 1991)。しかし図 3 にみられるように、各年層の厚さの場所によるばらつきは近接地点間においても大きく、年による変化も大きくて表面位置が前の年より低下する場合もある。また、風による堆積・削はくに伴う雪のいれかわりがあることを考慮すると、雪尺値から得られた年層の位置に、その年の雪が堆積したまま残留しているとは限らない。上田ら (1991) は、同じデータを用いてそれぞれの年層に相当する深さの積雪の平均 $\delta^{18}\text{O}$ 値を年別に求めたが、各雪尺地点間に共通した傾向は認められなかった。

図 3 と図 1 を比較すると、積雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値はおよそ 12 年間で -35% ~ -45% の範囲にあり、ドリフトの場合は 1 年間に 20% の幅で複雑に変化したのに対し、最大・最小が幅約 5% ずつせまくなった単調な変化を示す (ただし、積雪試料の採取間隔を小さくして時間的な分解能を上げれば、ドリフトとの差は縮まるかもしれない)。また、図 3 の 10 個のプロファイルに共通して特徴的なことは、表面から深さ 40 cm までの間に $\delta^{18}\text{O}$ 値が比較的急に高くなる (右向きにシフトする) 部分があることである。これらの極大値は、位置番号 1 を除き、いずれも -35% 程度にそろっている。また、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の極小部が位置番号 9 を除き、それらの下に続くが、値は一定でない。

この $\delta^{18}\text{O}$ 値の顕著な変化について検討するため、このトレンチ断面の層構造、密度分布などのうち比較的關係が認められた主な氷板 (ice crust) の分布と、前記の極大・極小位置を図 4 に示した。その他の極大・極小位置も小さい丸印で示してある。トレンチの表面は起伏があり、図 3 では各観測位置の表面を深さ 0 cm の座標にそろえたが、図 4 では位置番号 1 の表面を深さ 0 cm とし、それを原点とする鉛直座標を用いて実際の起伏を示してある (ただし、水平座標は鉛直座標の 3/10)。したがって、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の極大・極小の深さの各地点間における相対位置は、位置番号 6 など表面の高い所はそれに伴って図 3 に較べ高くなり、実際は 10 地点間でより水平に近い位置にそろっている。

図 4 より、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の極大は、トレンチ全体にわたって左右にほぼ連続した氷板の少し下部にあり、極小はほぼ連続した氷板の少し上にある傾向がみられる。これらの氷板は、かつて長期間同一表面が露出したためにできたと考えられ、堆積中断によって表層の積雪が昇華し、その $\delta^{18}\text{O}$ 値が極大化したのち新たな堆積をうけるというサイクルの中で、図 3 にみられるプロファイルを示すようになったと考えられる。そして、時間の経過と共に下部の積雪層の $\delta^{18}\text{O}$ 値は平均化するので、最も新しい堆積中断期 (表面から 1 番目のほぼ連続した氷板) とその前の中断期 (ほぼ連続したものとしては 2 番目の氷板) の間に形成された積雪層が、堆積中断の影響を最もよく保存し、前記の顕著な極大・極小を残していると考えられる。

このように、斜面下降風域の積雪の酸素同位体組成は、層構造形成後の堆積環境の影響を強く受けている。したがって、その値は積雪層形成の過程の解釈や、近接した地点間の積雪

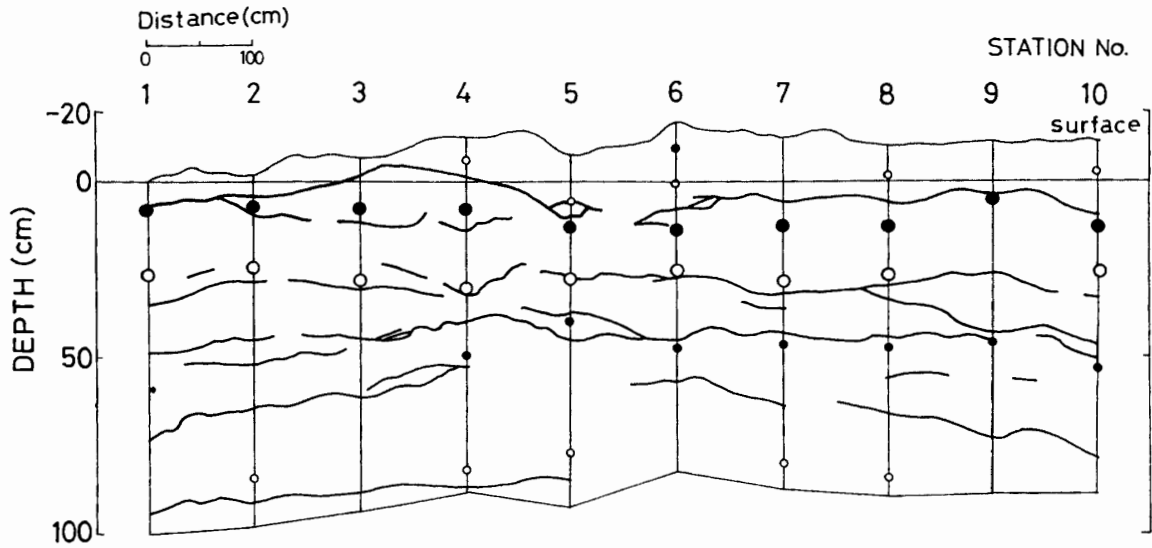


図4 みずほ基地雪尺列に沿った積雪断面のおもな氷板（太線）の分布と酸素同位体組成鉛直分布（図3）の極大・極小位置（丸印）。

（黒丸：極大，白丸：極小，大きい丸印：顕著な極大・極小）

Fig. 4. Distribution of main ice crusts at the cross section of deposited snow (thick line) along the snow stakes line at Mizuho Station and positions of maxima and minima (circles) in vertical profiles of oxygen isotopic contents (Fig. 3).

(Solid circles: maxima, open circles: minima, large circles: remarkable maxima and minima.)

層の時間的同定などに有効に利用できる可能性がある。

5. あとがき

南極氷板の斜面下降風域における、積雪層形成前の年間のドリフトと形成後の10数年間の積雪の酸素同位体組成について報告し、それぞれにみられる特徴をのべた。しかし、本報告では、3章と4章で示した双方の結果を結びつける考察はすすめられなかった。積雪層形成後の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変化については、SATOW and WATANABE (1985)などの研究があるが、双方の定量的な関係については、今なおmissing ringとして残されている。上田ら(1991)も述べているように、これは南極の斜面下降風域に限られた問題ではない。雪氷環境復元に安定同位体データを有効に利用するためにも、この点についての今後の研究が待たれる。

謝 辞

本研究には、現地で第26次越冬隊のみずほ基地に滞在された方々のご協力をいただき、島本高志隊員（気象庁）には、10月以降のドリフト試料を採取してもらった。ここに深く感謝いたします。

文 献

- 上田 豊・神山孝吉 (1991) : 南極氷床の異なった堆積環境における積雪の酸素同位体プロファイル II. 第 14 回極域気水圏シンポジウム講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 52-53.
- 上田 豊・神山孝吉・成田英器・佐藤和秀 (1991) : 南極氷床の異なった堆積環境における積雪の酸素同位体プロファイル. 南極資料, **35**, 39-46.
- NATIONAL INSTITUTE OF POLAR RESEARCH (1975-1987): JARE Data Reports, **27, 28, 36, 44, 48, 63, 71, 82, 94, 96, 110, 116, 125** (Glaciology 2-14).
- SATOW, K. and WATANABE, O. (1985): Net accumulation and oxygen isotope composition of snow on Mizuho Plateau, Antarctica. Ann. Glaciol., **6**, 300-302.
- WATANABE, O., FUJII, Y. and SATOW, K. (1988): Depositional regime of the katabatic slope from Mizuho Plateau to the coast, East Antarctica. Ann. Glaciol., **10**, 188-192.
(1992 年 9 月 24 日受付; 1992 年 12 月 16 日改訂稿受理)