

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上田 豊¹・神山孝吉²・成田英器³・佐藤和秀⁴Oxygen Isotope Profiles of Deposited Snow
in Different Depositional Environments of the Antarctic Ice SheetYutaka AGETA¹, Kokichi KAMIYAMA², Hideki NARITA³ and Kazuhide SATO⁴

Abstract: Vertical profiles of oxygen isotopic contents in deposited snow were obtained in the region where katabatic winds prevail (Mizuho Station: 70.7°S, 44.3°E, 2230 m), the inland dome-like plateau (Dome Camp: 77.0°S, 35.0°E, 3761 m) and the transitional zone between them (Advance Camp: 74.2°S, 35.0°E, 3198 m). At Mizuho Station, the $\delta^{18}\text{O}$ contents have high values around the hiatus layers. However, synchronous relations cannot be found between the neighboring profiles, since snow was exchanged due to deposition and erosion by strong winds. Inter-annual variations of oxygen isotopic contents in snow have been preserved better in the inner parts of the ice sheet between the three zones observed in this study. The profile at Dome Camp has good correlation with the inter-annual variation of summer temperature at 5000 gpm above the South Pole. This result suggests that the temperature at this level above the South Pole is representable for air temperature condition over the inland ice sheet, and the meteorological conditions in summer have a strong effect on the transition of the oxygen isotopic content of snow after deposition due to evaporation-sublimation.

要旨: 斜面下降風の卓越した地域と内陸高原ドーム域および両者の遷移帯における積雪の酸素同位体組成の垂直プロファイルと比較し、それぞれのプロファイルと各地域の堆積環境の特性をのべる。試料は、みずほ基地（高度 2230 m）の 101 本雪尺列にそった幅 10 m、深さ 1 m のトレンチ、前進拠点（3198 m）の 3 m 深雪穴、ドームキャンプ（3761 m）の 5 m 深雪穴から得た。試料の年代は、みずほ基地では雪尺測定値、前進拠点とドームキャンプとではトリチウム濃度と総ベータ線量のピーク位置から求めた。

斜面下降風域では雪の削はく・再堆積が起りやすいため、積雪の酸素同位体組成の経年変化は内陸ドーム頂部に近いほど良く保存される。ドームキャンプのプロファイルは、南極点上空 5000 gpm における夏の気温の経年変化とよい相関にある。これは夏の気象状態が、堆積後の蒸発・昇華による積雪表層の同位体組成の遷移に強く影響した結果と考えられる。

¹ 名古屋大学水圏科学研究所. Water Research Institute, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01.

² 京都大学理学部附属地球物理学研究施設. Geophysical Research Station, Faculty of Science, Kyoto University. Noguchibaru, Beppu 874.

³ 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.

⁴ 長岡工業高等専門学校. Nagaoka College of Technology, 888, Nishi-katagai-cho, Nagaoka 940.

1. 目的と方法

南極氷床の表層積雪の酸素同位体組成($\delta^{18}\text{O}$)のプロファイルは、沿岸部では積雪が多量であるため季節による変化をしめすが、内陸の斜面下降風が強い地域では、地ふぶきによる堆積一削はくや積雪のしもざらめ化による堆積後の同位体組成の変化のため、季節による変化を示さないことが知られている (SATOW and WATANABE, 1985; WATANABE *et al.*, 1988).

第26次南極地域観測隊 (JARE-26, 1985-86) では、風の弱い極冠高気圧域にある内陸ドーム (ドーム F) 頂上付近のドームキャンプ (DC: 77.0°S, 35.0°E, 高度 3761 m), 極冠高気圧域から斜面下降風域への遷移帯と考えられる前進拠点 (AC: 74.2°S, 35.0°E, 3198 m) で、それぞれ 5 m 深と 3 m 深のピット壁からいずれも深さ 3.5 cm 間隔の試料を採取した。また、斜面下降風域のみずほ基地 (MS: 70.7°S, 44.3°E, 2230 m) では、1972 年以来表面質量収支の観測が継続されている 1 m 間隔の雪尺ラインにそって、幅 10 m, 深さ 1 m のトレンチを掘り、幅 1 m ごとに深さ 3 cm 間隔の試料を採取した。試料採取位置を図 1 に示す。

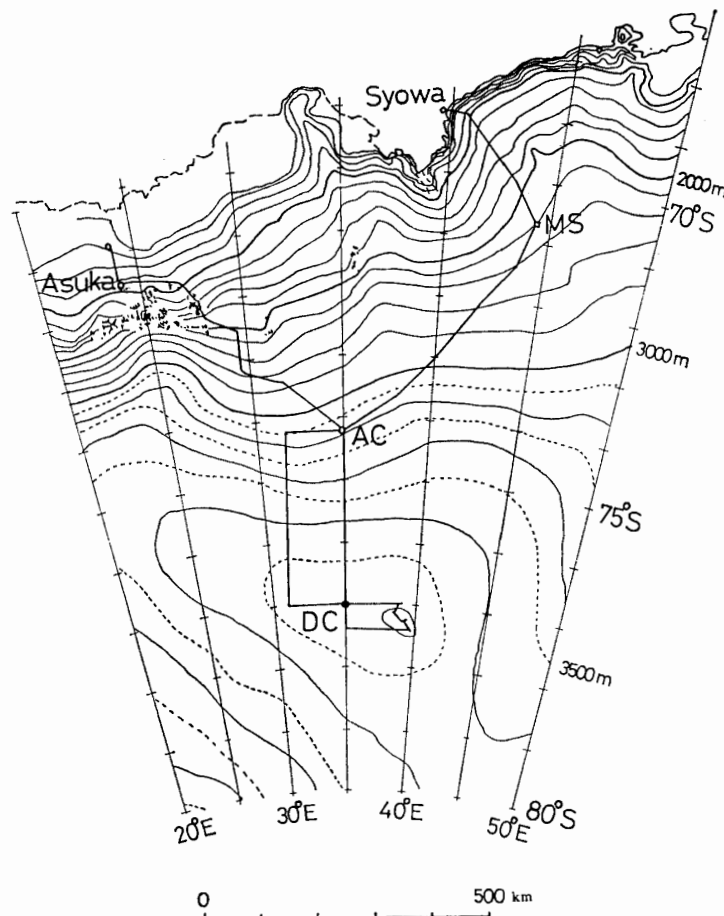


図 1 研究対象地域と試料採取地点 (MS: みずほ基地, AC: 前進拠点, DC: ドームキャンプ). 太い実線: JARE-26 内陸調査ルート.

Fig. 1. Studied area and sampling stations (MS: Mizuho Station, AC: Advance Camp, DC: Dome Camp).

以上の試料について、帰国後、名古屋大学水圏科学研究所の質量分析装置 MAT250 によって酸素同位体組成を測定した。積雪層の堆積時期は、南極点での例 (JOUZEL *et al.*, 1979, 1983) に基づき、ドームキャンプについては 1966 年のトリチウム濃度のピーク (KAMIYAMA *et al.*, 1989), 1965 年と 1955 年の総ベータ線量のピーク, 前進拠点については 1966 年のトリチウムのピーク位置を基準にして求めた。またみずほ基地では、毎月～隔年の雪尺測定により、過去 13 年間の雪面レベルの変化が記録されている (NATIONAL INSTITUTE OF POLAR RESEARCH, 1975-1987)。これらをもとに、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の特徴をのべ、それらが何を示しているかを特に深層掘削が予定されている内陸ドーム域について検討する。

なお、上記の方法によって得られた各試料採取点における年層の平均の厚さおよび各年層当たりの試料個数の平均値を表 1 に示した。これより、各地点では 1 年間平均 2~3 個程度のサンプリングであるから、本報告では酸素同位体組成の季節による変化は論じない。

表 1 試料採取地点における平均年層厚, 採取間隔, 平均年間試料個数

Table 1. Data at sampling stations.

Station	Mean thickness of annual layer (cm)	Interval of sampling (cm)	Mean annual sample number
Mizuho Station	1973-85: 6.3 (2.7)	3.0	2.1
Advance Camp	1966-85: 11.8 (5.0)	3.5	3.4
Dome Camp	1966-85: 9.2 (3.2)	3.5	2.6

(): water equivalent.

2. 斜面下降風域 (みずほ基地) の特徴

みずほ基地では、卓越風向にはほぼ直交した 101 本雪尺ラインの中央部の 10 本 (No. 51, 152-160) の風下約 50 cm における積雪断面を、1985 年 9 月 2-6 日にトレンチを掘って観測した。図 2 に、各年の夏の雪尺測定値をもとに、各年層があった深さで採取した積雪の酸素同位体組成の平均値の変化を雪尺値から求めた年代スケールで、1 m ずつ離れた地点 (No. 51, 152-156) の順に示した。2 番目 (No. 152) と 3 番目 (No. 153) の地点では、1980 年の年層に相当する位置の同位体組成が比較的高く、引き続いた欠層年の間に雪の変態がすすんだ結果ともみられるが、全体としては共通した傾向はみられない。これは各年の雪面位置にその時に堆積された雪がそのまま残っているとは限らず、むしろ強い斜面下降風による地ふぶきで、堆積後に積雪の移動がひんばんに生じているからと考えられる。したがって、斜面下降風域の同位体プロファイルから、その年々変動を短いタイムスケールで論じることは困難といえる。

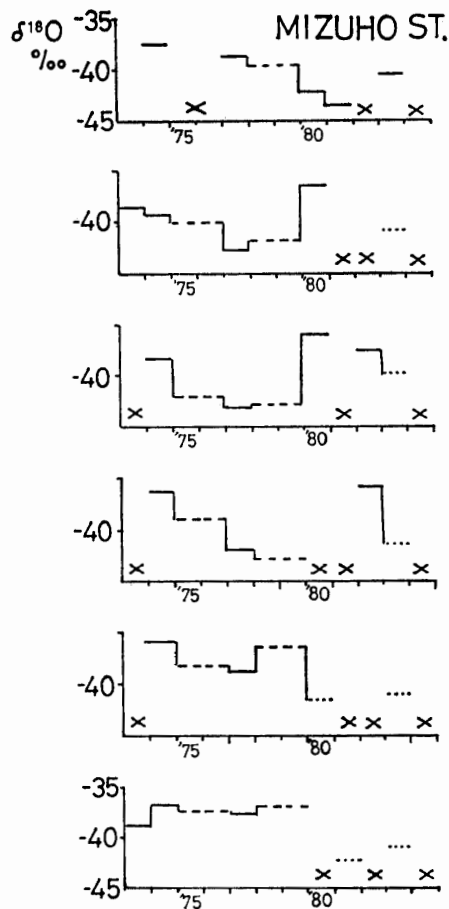


図 2 みずほ基地 101 本雪尺ラインにおける各年層に相当する深さの積雪の酸素同位体組成。(順番に 1 m ずつ離れた 6 地点での例)
 ×: 欠層年, 点線: 一部欠層, 破線: 年ごとの雪尺値欠測のため 2 年分の平均値

Fig. 2. Oxygen isotopic contents of each annual layer level along the 101-stake row at Mizuho Station. (Distance between the profiles is 1 m).
 ×: hiatus layer, dotted line: data of annual layers which were partly blown away, dashed line: average of 2 annual layers.

3. 内陸高原域 (前進拠点, ドームキャンプ) の特徴

図 3 に, 前進拠点 (1986 年 1 月 4 日) とドームキャンプ (1985 年 12 月 7・8 日) のピットから得られた酸素同位体組成プロファイルをならべて示した. 同試料のトリチウム濃度のピークから得られる 1966(冬)-85 年の平均年間質量収支は表 1 に示したが, 総ベータ線量のピーク位置 (180 cm 深-水当量 62 cm, 264 cm 深-水当量 92 cm) から求めたドームキャンプの値は, 1955 年 (1 月)-65 年 (1 月) および 1965 年 (1 月)-85 年 (12 月) とともに 3.0 cm (水当量) である. トリチウムのピークから求めた 1966 年冬の層は, 前進拠点で 225 cm 深付近 (水当量約 95 cm), ドームキャンプで 174 cm 深 (水当量 60 cm) であった.

斜面下降風は内陸ドーム頂部に近づくほど弱くなり, 高度 3500 m 付近, すなわち前進拠点とドームキャンプの間からその影響がなくなる (AGETA *et al.*, 1989). 図 3 より前進拠点の同位体プロファイルは, 同時期のドームキャンプにくらべてややスムーズな変化をみせている. みずほ基地のプロファイルは前進拠点よりもさらになめらかになる.

このように内陸ドーム頂上付近から斜面下降風域へと移るにつれてプロファイルが平滑化されることは, 斜面下降風によって積雪が再配分される程度のちがいを反映していると考えられる. したがって, 内陸ドーム頂上付近の積雪の酸素同位体プロファイルが, 本報告では

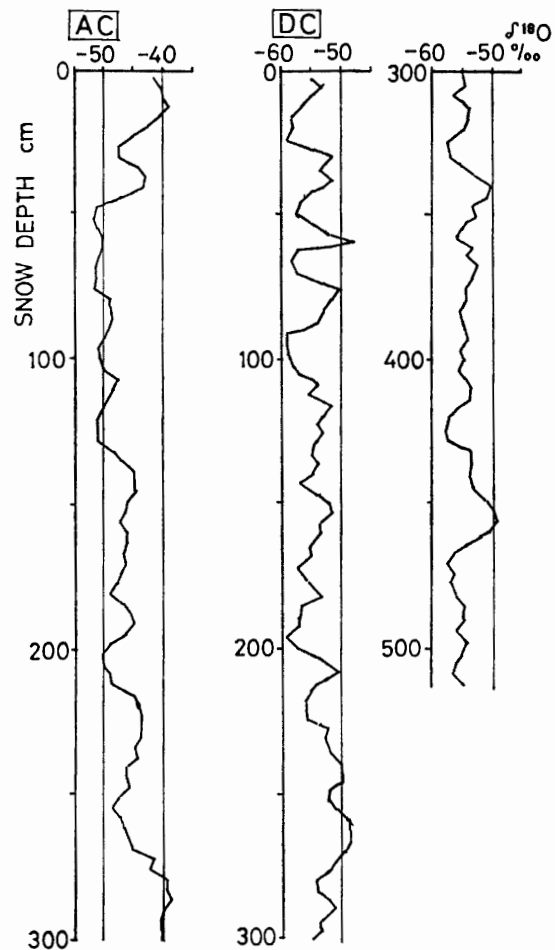


図 3 前進拠点 (AC) とドームキャンプ (DC) における積雪の酸素同位体プロファイル
 Fig. 3. Oxygen isotopic contents of deposited snow at Advance Camp (AC) and Dome Camp (DC).

ふれていない沿岸部を除き、堆積した各年の同位体組成を最もよく保存しているといえよう。

4. 内陸ドーム頂部の酸素同位体組成についての考察

そこで、内陸ドーム頂上付近（ドームキャンプ）のプロファイルが何を表しているかを、他地域の同位体プロファイルや気温と比較検討してみる。

表 1 に示したように、ドームキャンプでの 1 年間当たりの平均試料個数は 2.6（前進拠点では 3.4）である。そこで、同位体組成の年々の変化傾向をみるため試料 3 個ずつの移動平均をとり、深さ方向の積雪の水当量を平均年間質量収支から求めた時間軸におきかえて図 4a に示した。参考のため、同様にして求めた前進拠点の結果も同図に示したが、両者の間にはよい相関はみられない（1966–85 年の相関係数：-0.13）。

このようにして得られたドームキャンプの酸素同位体の経年変化を、同流域にある Y200 (71.8°S, 48.9°E, 2880 m, ドームキャンプより 710 km: WATANABE *et al.*, 1988, Fig. 3b), 同じ東南極内陸高地の到達不能極 (82.1°S, 55.1°E, 3718 m, ドームキャンプより 680 km: PICCIOTTO *et al.*, 1968, Fig. 3) および南極点 (2804 m, ドームキャンプより 1430 km: JOUZEL *et al.*, 1983, Fig. 2) の 3 地点でえられている経年変化（南極点は水素同位体）と比較した。

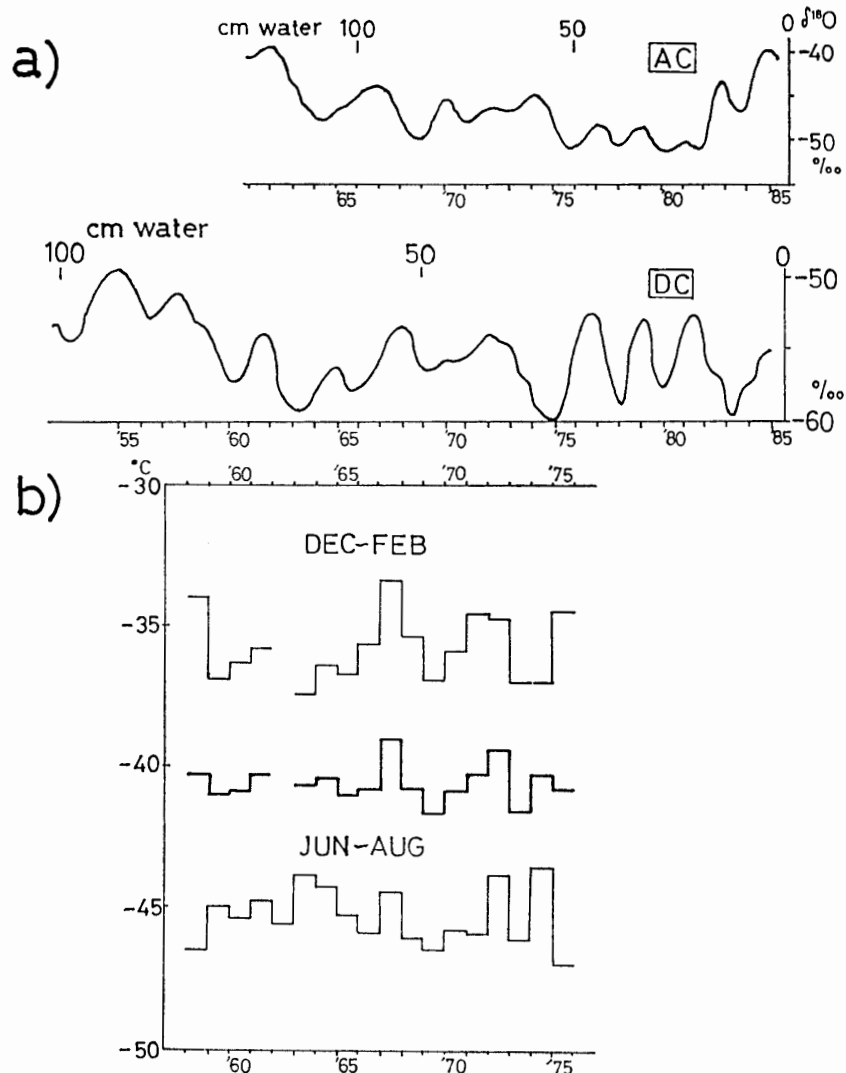


図 4a 前進拠点 (AC) とドームキャンプ (DC) の積雪の酸素同位体組成の経年変化。(同位体値は 3.5 cm 深ごとの値 3 個の移動平均。年代軸は、トリチウム濃度と総ベータ線量のピークから求めた平均年間質量収支で決定。)

b 南極点上空 5000 gpm での夏 (12月-2月), 冬 (6月-8月) および両季 (中央の太線) の平均気温の経年変化。

Fig. 4a. Inter-annual variations of oxygen isotopic contents of deposited snow at Advance Camp (AC) and Dome Camp (DC). (running mean of 3 samples.) Time scales of snow layers were decided from the mean annual balance obtained from a peak of Tritium content (in 1966) at AC, and peaks of that and gross β activities (in 1965, 1955) at DC.

b. Inter-annual variations of mean air temperature in summer (December-February) and winter (June-August) at 5000 gpm above the South Pole. Averages of both seasons (December-February and June-August) are shown with thick lines.

これらの3地点では、それぞれ1981、1964、1977年までの結果がしめされているが、ドームキャンプではY200および南極点での結果に対して、1970年前後まで比較的似かよった経年変化のパターンがみられるものの、全体的には良い相関関係は認められなかった。これは、降水の酸素同位体組成を支配する気象要素のうえに、堆積後の雪粒の移動や変態にかかわる環境の地域による違いが重なっているためと考えられる。

そこで、気象要素のうち、酸素同位体組成との関係が深いことが知られている気温との相関について検討してみる。ドームキャンプでの年々の気温データはないので、南極点および同じ東南極内陸部のポストーク基地 (78.5°S, 106.9°E, 3488 m, ドームキャンプより 1600 km) の地上平均気温の経年変化パターンとドームキャンプの同位体の経年変化パターンを比較したところ、これらの間にも似かよった関係は認められなかった。南極氷床上では強い接地逆転層が形成され、その強さは季節や場所によって異なるため、たがいに 1000 km 以上離れた地点の地上気温と同位体組成の相関は良くないのであろう。

次に、南極点上空の 1958 年から 1975 年までのレーウィンゾンデによる気温データ (U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 1962-1977) がえられたので、対流圏中層 (5000 gpm) と下部成層圏 (15000 gpm) について検討した。原データは一定気圧レベルごとにえられているが、5000 gpm については $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ gpm}$, 15000 gpm については原データからえられる各季節の平均的な高度による変化率をもちいて一定高度の値を求めた。比較したのは、夏(12月-2月)、冬(6月-8月) および両者(夏冬計6カ月)の平均気温で、いずれも 00GMT に観測された平均値である。

その結果、ドームキャンプの同位体の経年変化に対し南極点上空 15000 gpm の気温経年変化は、夏、冬、両者の平均値とも共通したパターンはみられなかった。同 5000 gpm の気温経年変化は図 4b に、図 4a のドームキャンプの年代スケールに合わせて示した。図 4 より、ドームキャンプの同位体経年変化に対し、南極点上空 5000 gpm 気温では、夏の経年変化がもっとも良い相関があることがわかる。ドームキャンプの同位体経年変化と南極点 5000 gpm 気温の相関係数は、冬の気温が -0.13 に対し、夏は 0.63 である。なお、南極点の夏(12月-2月)の地上気温については 0.48 であった。

上記のことは、南極点上空の対流圏中層の気温とドームキャンプ付近の大気温度環境との関係を間接的に示している。とくに夏の気温のシグナルが、積雪の酸素同位体組成の経年変化に強く影響している結果がえられたことを考察してみる。

前述した南極点 (JOUZEL *et al.*, 1983) や到達不能極 (PICCIOTTO *et al.*, 1968) における積雪の同位体の年々の平均値は、同位体組成の年間の最大値(夏)と最小値(冬)から年々の層を識別して得たものである。両地点とも最小値にくらべ最大値の年々の変化が大きく、年平均値の経年変化のパターンは各年の山、すなわち夏の積雪層の同位体組成に支配される傾向にある。

JOUZEL *et al.* (1983) は南極点において、地上から 500 mb 面までの気温と積雪の水素同位体組成の年々のデータについて両者の相関を求めた。そして、同位体の最大値と夏(12月-1月)の気温、最小値と冬(4月-9月)の気温、同位体組成の年平均値と年平均気温の相関を比較し、夏がもっとも良く冬が良くないことを示した。以上の結果は、夏の気温が年間の積雪の同位体組成に支配的であることを示唆している。

しかし、降水の同位体組成はその形成時の気温で規定されるから、年間で最も降水(積雪)の少ない夏季の気温が年間の積雪の同位体組成に強く影響することについては、堆積後の二次的な過程を考慮せねばならない。とくにドームキャンプ付近の年間質量収支は南極点の約1/3と少ないため、この地域の積雪は夏の高温・少降水期に、沈まない太陽からの放射にさらされて蒸発・昇華がすすみ、積雪表層の同位体組成はプラスの方向に大きく変化するであろう。夏の気温が同位体プロファイルと良い相関にあるのは、夏の気温がこの二次的過程の指標要素でもあることを示していると考えられる。

5. 結 語

南極氷床は地域によって異なった堆積環境をもつが、なかでも内陸ドーム域は風が弱いので雪の移動がおこりにくく、積雪の酸素同位体組成が斜面下降風域にくらべて良く保存されていることをのべた。そして同地域の同位体組成の経年変化は、内陸氷床のとくに夏の気温の経年変化と関係が深く、それには堆積後の夏の蒸発・昇華過程が強く影響していると考えた。

しかし、4章で考察したことについては今後の研究に待つべき点が多い。まず、確かな時間軸のうえで検討できるように、積雪の季節・年層を判別できる同位体のサンプリングをすること。また、同位体組成を規定し変化させる気象条件を現地で観測し、その過程を明らかにすること。このような現地観測は、内陸深層コアからの同位体データを解釈するうえにも重要な基本情報となるであろう。それらの研究に、本研究が速報として参考になれば幸いである。

文 献

- AGETA, Y., KAMIYAMA, K., OKUHIRA, F. and FUJII, Y. (1989): Geomorphological and glaciological aspects around the highest dome in Queen Maud Land, East Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **2**, 88-96.
- JOUZEL, J., MERLIVAT, L., POURCHET, M. and LORIUS, C. (1979): A continuous record of artificial tritium fallout at the South Pole. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **45**, 188-200.
- JOUZEL, J., MERLIVAT, L., PETIT, J. R. and LORIUS, C. (1983): Climatic information over the last century deduced from a detailed isotopic record in the south pole snow. *J. Geophys. Res.*, **88**, 2693-2703.
- KAMIYAMA, K., AGETA, Y. and FUJII, Y. (1989): Atmospheric and depositional environments traced from unique chemical compositions of the snow over an inland high plateau, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **94**, 18515-18519.
- 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).
- PICCIOTTO, E., CAMERON, R., CROZAZ, G., DEUTSCH, S. and WILGAIN, S. (1968): Determination of the rate of snow accumulation at the pole of relative inaccessibility, eastern Antarctica: A comparison of glaciological and isotopic methods. *J. Glaciol.*, **7**(50), 273-287.
- SATOW, K. and WATANABE, O. (1985): Net accumulation and oxygen isotope composition of snow on Mizuho Plateau, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **6**, 300-302.
- U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE (1962-1977): Climatological Data for Antarctic Stations. No. 1-14.
- 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.

(1990年12月27日受付; 1991年1月8日改訂稿受理)