

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

加藤喜久雄*・渡辺興亜**

Oxygen Isotope Profiles in Firn Cores from Mizuho Plateau, Antarctica

Kikuo KATO* and Okitsugu WATANABE**

Abstract: Oxygen isotope, gross β -radioactivity and stratigraphic determinations were done on firn cores from Mizuho Plateau, Antarctica. Factors controlling oxygen isotope variations in firn were discussed. From the results of gross β -activity measurements, it is obvious that the cycle in oxygen isotope profile is once a year in some areas due to the seasonal variation in oxygen isotopic composition of snowfall. In other areas, the cycle is not once a year. The following two factors are considered to affect strongly oxygen isotope variations in firn, from the results of direct stake measurements of snow accumulation and observations of surface conditions of the ice sheet, 1) changes in time of erosion, deposition and none on snow surface, 2) subsequent movement of water vapor in firn.

要旨: 南極氷床の浅層ボーリングコアについて、酸素同位体組成および核実験による人工放射線量(総 β 線量)の測定と積雪層位解析を行い、積雪量の雪尺による実測や雪面観察の結果を参考にして、コアにおける酸素同位体の垂直分布について検討した。総 β 線量の測定結果から判断して、コア中の酸素同位体組成の変動が、降雪の酸素同位体組成の季節変化に基づく1年につき1周期でない地域があることがわかった。この地域では、堆雪が連続的に生ぜず、削剝、堆雪、無堆雪という堆雪環境の時間的変動と、堆雪後の積雪層内における水蒸気の移動による雪の変態の二つの因子が、コア中の酸素同位体の分布を大きく規制していると考えられる。この二つの因子の規制のない地域でのボーリングコア中の酸素同位体組成の変動は、1年周期になっており、上の考え方が間違いでないことが明らかにされた。

1. はじめに

地球上における水の循環過程において、大量の水が固相として存在する南極氷床が、どの

* 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.

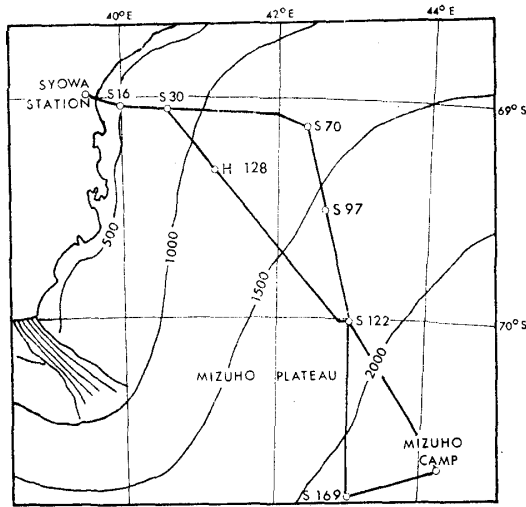


図 1 南極みずほ高原におけるボーリング地点 S 97 と H 128

Fig. 1. Map showing the boring stations S 97 and H 128 in Mizuho Plateau, East Antarctica.

ような役割を果たし、どのように保持されているのか、ということを知るための研究の一環として、みずほ高原(図 1)において氷床表面層の形成される過程、すなわち氷床表面に毎年蓄積される積雪がどのような機構のもとに生じるか、それが地域的にどのように変化するかについて研究を行っている。そのためには、雪面と大気との間の相互作用、堆積と削剝に関連する表面状態の過程、積雪量およびその経年変化などを明らかにする必要がある。このような研究にとって、雪氷現象の時間配列、すなわち降雪の季節、積雪層の形成時期などを明らかにすることは不可欠であり、それを可能にするためには、地球化学的研究方法と雪氷学的研究方法とを結びつけて進める必要がある。その研究結果の一部について、表面積雪層に対するボーリングコアに関する研究について、酸素同位体の分布を主題に報告する。

EPSTEIN and MAYEDA (1953) は降水の $\delta^{18}\text{O}$ の値が、特に高緯度において、降水の生成温度により大きく規制されていることを指摘した。降水の生成温度が低いほど、降水の $\delta^{18}\text{O}$ 値は小さくなるのである。DANSGAARD (1954) は氷床のボーリングコアについて、 $\delta^{18}\text{O}$ 値を測定することにより、積雪量や過去の気候に関する情報がえられる可能性を示した。

グリーンランド氷床においては、浅層ボーリングコアの $\delta^{18}\text{O}$ 値の分布に周期的変動が認められ、核実験による人工放射線量の測定、積雪量の実測および積雪層位解析などの結果から判断して、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動が季節変化に基づく 1 年周期であることが認められている(たとえば、EPSTEIN and SHARP, 1959; AMBACH and DANSGAARD, 1970)。ところが、南極においては浅層ボーリングコア中の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動周期が、人工放射線量の測定、積雪量の実測、積雪層位解析などの結果から判断して、1 年周期と考えられるところもあるが(たとえば、EPSTEIN *et al.*, 1965)、そうでないところもある(たとえば、PICCIOTTO *et al.*, 1968)。

それでは、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動は一体何を意味しているのか、ということが問題になる。

そこで、みずほ高原よりえた浅層ボーリングコアについて、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の測定、核実験による人工放射線量（総 β 線量）の測定、積雪層位解析（層構造、粒度、密度、霜ざらめ化の程度）を行い、さらに積雪量の実測結果などを参考にして、コアにおける $\delta^{18}\text{O}$ 値の垂直分布について検討した。

2. 試料と分析法

2.1. 試料

次の2本のボーリングコアについて研究を行った。ボーリング地点は図1に示す。

S 97: 高度 1,654 m の S 97 で 1971 年 1 月 19 日にボーリングを行い、深度 4 m 97 cm に達するコアをえた。

H 128: 高度 1,378 m の H 128 で 1973 年 1 月 26 日にボーリングを行い、深度 10 m 00 cm に達するコアをえた。

これらのコアをアルミフォイルで密着包装したうえ、発泡スチロールを断熱材とした容器に入れ、さらに現場の雪をつめることによって容器内の水蒸気量を飽和にした上で冷凍して、北海道大学低温科学研究所の低温室へ輸送した。その低温室で積雪層位解析（層構造、粒度、密度、霜ざらめ化の度合）を行い（WATANABE, 1977）、その結果に基づいて $\delta^{18}\text{O}$ と総 β 線量の測定のための試料を採取した。これらの試料は液体にして名古屋大学水圏科学研究所へ移送された。

2.2. 分析法

酸素同位体組成：EPSTEIN and MAYEDA (1953) の方法を一部修正した方法で測定した。測定は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行った。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 $\pm 0.2\text{‰}$ である。

総 β 線量：200～500 g の試料を濃縮し、測定用のステンレス製試料皿に移し、赤外線ランプ下で蒸発乾固する。総 β 線量の測定は、福井県衛生研究所の富士通ピコベータ PBS-1 β

線測定装置で行った。バックグラウンドは 0.4 cpm である。測定誤差は通常 $\pm 3\%$ 以下であるが、 β 線量の非常に小さい試料では 10% に達するものもある。

3. 結果と考察

1971年1月19日に S97 の地点で掘削したボーリングコアにおける $\delta^{18}\text{O}$ 値と総 β 線量の垂直分布を図 2 に示した。同時に層構造、霜ざらめ化の度合、粒度、密度の垂直分布も示した。これらの積雪層位解析結果の表示の説明のための凡例を図 3 に示した。総 β 線量の垂

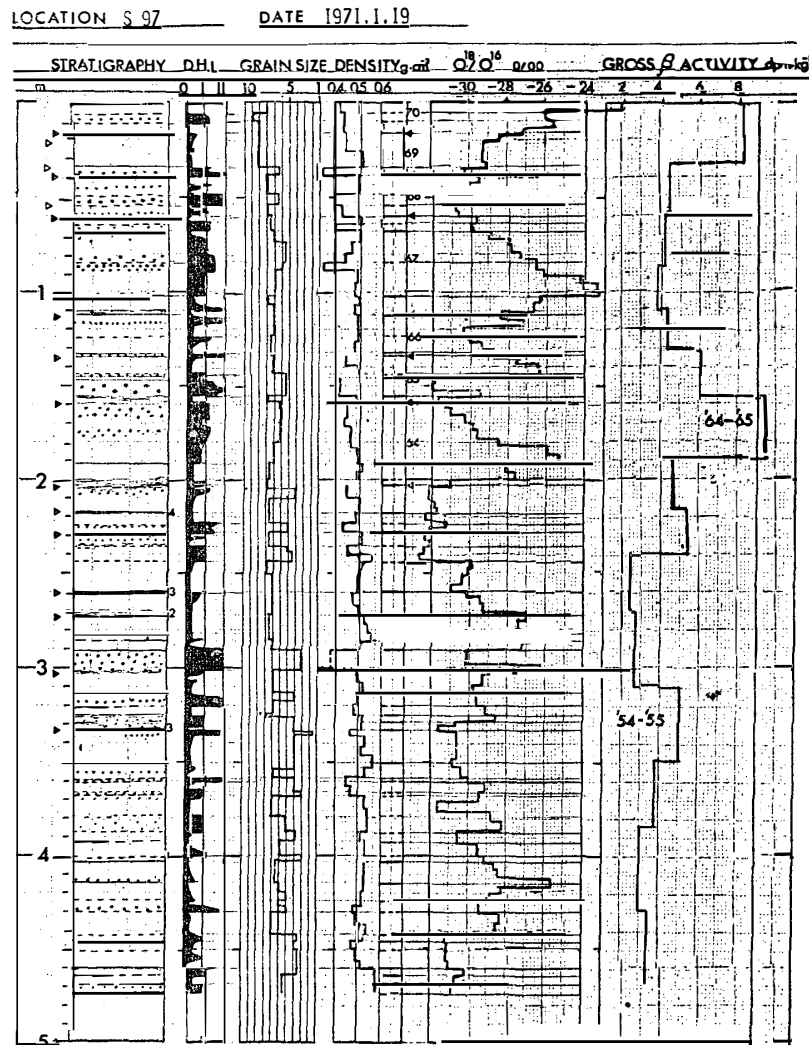


図 2 南極みずほ高原からえた S97 ボーリングコアにおける酸素同位体組成 ($\delta^{18}\text{O}$), 総 β 線量, 積雪層位解析結果の垂直分布

Fig. 2. Oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$), gross β -radioactivity and stratigraphic profiles in firn core from S97, in Mizuho Plateau, East Antarctica.

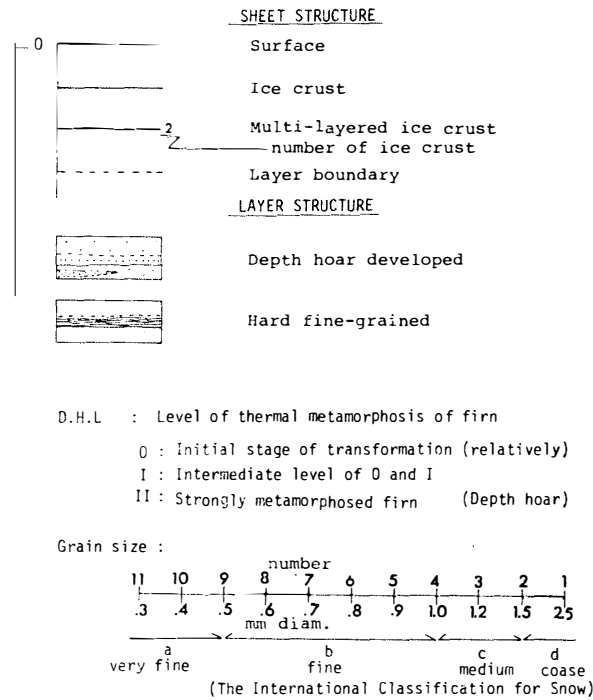


図3 図2と4に示す積雪層位解析結果の表示の説明
Fig. 3. Stratigraphic symbols used in Figs. 2 and 4.

直分布に二つのピークが認められる。このことは、核爆発実験の放射性降下物質により供給された総 β 線量のピークの時期、1954年末～1955年始めと1964年末～1965年始め（たとえば PICCIOTO and WILGAIN, 1963; CROZAZ, 1969）の雪面が、コアにおける総 β 線量の垂直分布の二つのピークがさし示す深さにあったことを示している。これに基づいて、ボーリングコア中の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動について検討すると、1965年～1970年の6年間に $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動には3周期、細かな変動の周期を加えても5周期しか認められない。1955年～1964年の10年間における $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動は4ないし7周期のみである。明らかに $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動は、1年につき1周期になっていない。このことは、コア中の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動が降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の季節変化を反映していないのではないかと、という酸素同位体による年積雪量決定における基本的で重大な問題を提起している。もしそうであるなら、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動は何により規制されていて、一体何を意味するのか、ということが問題になる。

ボーリングコア中の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動を規制する因子として、もちろん降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の季節変化は1つの因子であるが、その他に次のような因子が考えられる。S97の周辺地域における雪面状態の地域的・時間的変動の観察 (WATANABE and AGETA, 1972) および雪尺による積雪量の実測 (AGETA and WATANABE, 1972; YAMADA *et al.*, 1975; YOKOYAMA, 1975)

の結果から、S 97 付近は一定期間堆雪の生じない雪面 (glazed surface) の出現する下限高度であり(この付近から高度約 3,000 m にかけての氷床斜面は glazed surface の分布で特徴づけられる)、削剝、堆雪、無堆雪という堆雪環境が地域的、時間的に変動している地域であると推定される。このような堆雪環境の S 97 における時間的変化は、堆雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動を規制していないはずがない。さらにこのような堆雪環境下で、堆雪のないところでは長期間にわたり埋没が生じない表面層内が大きな温度勾配の場となり、霜ざらめ化が進行する。霜ざらめ化に伴う積雪層内の水蒸気移動は $\delta^{18}\text{O}$ 値の変化に大きな影響を与えるにちがいない。

この二つの因子が S 97 のボーリングコア中の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動を大きく規制しているならば、逆に、そのような堆雪環境の時間的変動がなく、水蒸気の移動があったとしても小規模な単層内で生じるような、年積雪量がより大きい地点でのボーリングコア中の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動は季節変化に基づく 1 年周期になっているはずである。そこで、そのような条件に適合した H 128 (図 1) で掘削したボーリングコアについて、S 97 ボーリングコアと同様の解析、測定を行った。その結果は、図 4 に示すように、 $\delta^{18}\text{O}$ 値は積雪層位解析の結果とよく関連して変動しており、そのうえ総 β 線量に基づく 1965 年～1972 年の 8 年間分の深さまでのそれらの変動は 8 周期である。 $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動は降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の季節変化を反映した 1 年周期なのである。また、S 97 に比べかなり大きな積雪量であることも明らかである。これらのことは、先にあげた二つの因子が、降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の季節変化に基づく 1 年周期とは大きく異なった $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動をもたらしている、と考えることに大きな間違いがないことを示すものである。

積雪層の $\delta^{18}\text{O}$ 値をきめる因子として基本的には降雪、堆雪にかかわる気象、気候因子と堆雪後の積雪の変態過程に伴う変動因子の二つがあり、この二つの基本的な因子は、南極氷床の地域により、また同一地点にあっても時期によって変化する。したがって氷床表面層の積雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値が何によって規制されているかを明らかにするために、さきにのべた気象、気候因子および変態因子がどのように地域により、積雪条件によって変化するか明らかにする必要がある。そのため、1974 年～1975 年に、昭和基地とみずほ観測拠点で雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の季節変化を知るための雪、内陸トラバースの時には雪面の雪、2 m ピットの雪、ボーリングコアを採取し、雪面および表面積雪層形成過程における雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値とその変化について研究を進めている (KATO, 1977; 加藤他, 1977; WATANABE, 1977)。また、積雪層内における水蒸気移動に関する実験を行っており、その結果は積雪変態過程に伴う $\delta^{18}\text{O}$ 値の変

化が無視しえないほど大きいことを示している。

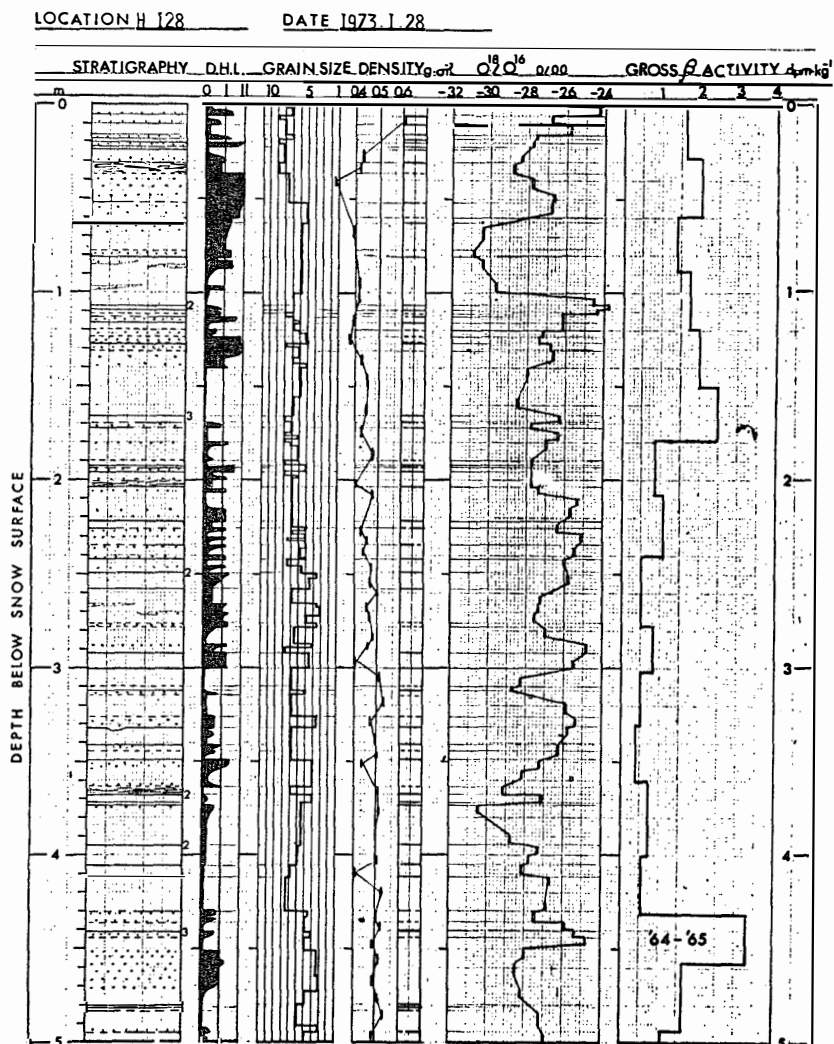


図 4 南極みずほ高原からえた H 128 ボーリングコアにおける酸素同位体組成 ($\delta^{18}\text{O}$), 総 β 線量, 積雪層位解析結果の垂直分布

Fig. 4. Oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$), gross β -radioactivity and stratigraphic profiles in firn core from H 128, in Mizuho Plateau, East Antarctica.

4. ま と め

南極氷床の浅層ボーリングコアについて, $\delta^{18}\text{O}$ 値および核実験による人工放射線量(総 β 線量)の測定と積雪層位解析を行い, 積雪量の実測結果や雪面観察結果を参考にして, コアにおける $\delta^{18}\text{O}$ 値の垂直分布について検討した. 総 β 線量の測定結果から判断して, コアにおける $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動が, 降雪の生成温度により規制された, $\delta^{18}\text{O}$ 値の季節変化に基

づく1年につき1周期でない地域があることがわかった。この地域では堆雪が連続的に生ぜず、一定雪面が長期間にわたって大気にさらされる (hiatus surface) ような、削剝、堆雪、無堆雪という堆雪環境の時間的変動と、堆雪後の積雪層内における水蒸気の移動による雪の変態の二つの因子が、コア中の $\delta^{18}\text{O}$ 値の分布を大きく規制していると考えられる。そのような二つの因子の規制のない地域でのボーリングコア中の $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動は、降雪の $\delta^{18}\text{O}$ 値の季節変化を反映した1年周期になっており、上の考え方が間違いでないことが明らかにされた。

なお、本研究にあたり、酸素同位体組成の測定にご協力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、総 β 線量の測定にご協力いただいた福井県衛生研究所の早川博信氏、試料採取にご協力いただいた北海道大学低温科学研究所の石田完氏をはじめ白瀬氷河流域の長期雪氷研究計画関係者、適切な助言をいただいた名古屋大学水圏科学研究所の北野康、樋口敬二両氏の諸氏に心から感謝の意を表します。

文 献

- AGETA, Y. and WATANABE, O. (1972): Net accumulation of snow by stake measurements in Mizuho Plateau, East Antarctica, 1968–1971. *JARE Data Rep.*, **17** (Glaciol.), 38–47.
- AMBACH, W. and DANSGAARD, W. (1970): Fallout and climate studies on firn cores from Carrefour, Greenland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **8**, 311–316.
- CRAIG, H. (1961): Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science*, **133**, 1833–1834.
- CROZAZ, G. (1969): Fission products in Antarctic snow, an additional reference level in January 1965. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **6**, 6–8.
- DANSGAARD, W. (1954): The O^{18} abundance in fresh water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **6**, 241–260.
- EPSTEIN, S. and MAYEDA, T. (1953): Variation of O^{18} content of water from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4**, 213–224.
- EPSTEIN, S. and SHARP, R. P. (1959): Oxygen isotope studies. *Trans. Am. Geophys. Union*, **40**, 81–84.
- EPSTEIN, S., SHARP, R. P. and Gow, A. J. (1965): Six-year record of oxygen and hydrogen isotope variations in South Pole firn. *J. Geophys. Res.*, **70**, 1809–1814.
- KATO, K. (1977): Oxygen isotopic composition and gross β -radioactivity in firn. *JARE Data Rep.*, **36** (Glaciol.), 158–169.
- 加藤喜久雄・渡辺興亜・佐藤和秀 (1977): 南極みずほ高原の雪の酸素同位体組成. *南極資料*, **58**, 263–270.
- PICCIOTTO, E. and WILGAIN, S. E. (1963): Fission products in Antarctic snow: a reference level for measuring accumulation. *J. Geophys. Res.*, **68**, 5965–5972.
- 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**, 273–287.
- YAMADA, T., NARITA, H., OKUHIRA, F., FUKUTANI, H., FUJISAWA, I. and SHIRATSUCHI, T. (1975) : Net accumulation of snow by stake measurement in Sôya Coast–Mizuho Plateau in 1971–1973. *JARE Data Rep.*, **27** (Glaciol.), 10–67.
- YOKOYAMA, K. (1975): Net accumulation by stake measurements. *JARE Data Rep.*, **28** (Glaciol.), 62–82.
- WATANABE, O. (1977): Stratigraphic observation of surface snow cover. *JARE Data Rep.*, **36** (Glaciol.), 61–125.
- WATANABE, O. and AGETA, Y. (1972): Surface condition of the ice sheet in the Mizuho Plateau–West Enderby Land area, East Antarctica, 1969–1971. *JARE Data Rep.*, **17** (Glaciol.), 48–76.