

安定同位体組成からみたドライバレーの歴史の変遷

中 井 信 之*・水 谷 義 彦*

Geological History of the Dry Valleys, Antarctica, Based on the Stable Isotope Studies

Nobuyuki NAKAI* and Yoshihiko MIZUTANI*

Abstract: In 1973, DVDP 4 drilling was performed to obtain unconsolidated sediments of Lake Vanda, McMurdo Oasis. The cored sediments were found to contain layered salt concretions composed of gypsum, thenardite and calcite. On the basis of stable isotope compositions, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{34}\text{S}$, of the water and salts, it was concluded that the lake and the Wright Valley were once a fjord containing sea water and isolated from the ocean by glaciation. Micropaleontological studies for the cored sediments were also performed, indicating the existence of marine fossil fragments, marine sponge microscle and marine centric diatom, only below the 1st gravel layer. This supports the above conclusions.

In the 1975–1976 field survey season, layered mirabilite (or gypsum), ice and marine sediment, which were found under moraines at the height of 60 to 150 m above sea level near the coast of McMurdo Sound, have been studied on their occurrences and analyzed isotopically. These sulfate minerals and ice were found to be of marine in origin according to their isotopic compositions. This fact suggests that the sea water level largely fluctuated in geologic time and reached possibly 150 m higher than the present, and the present Wright Valley and Taylor Valley were under ocean water in the past.

要旨: 1973 年, ドライバレーのライト谷にあるバンダ湖で DVDP 4 の掘削が行われ, 湖底堆積物中に gypsum, thenardite, calcite からなる層状 concretion が見出された. この塩類と湖水の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$ の測定を行い, その結果, ライト谷およびバンダ湖は過去海で, フィヨルドであったことが結論された. さらに, このことを裏付けるため, 微化石の研究を行い, 海綿の骨片や海洋性珪藻の破片を確認した.

1975~1976 年シーズンに, ドライバレーのマクマード海峡沿岸を調査し, 現海面より 60~150 m 高所に, 厚い層状の mirabilite (または gypsum), 氷, 海洋堆積物が積み重なっている箇所を数カ所見出した. これらの安定同位体組成を測定した結果, 硫酸塩鉱物と氷の海洋起源を確認した.

以上のように, 過去海面が現在より 150 m も高い時代のあったことが明らかに

* 名古屋大学理学部地球科学教室. Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464.

なり，ドライバレーの中で標高 95 m 以上のライト谷やバンダ湖，その他テイラー谷も，過去海底であった時代があったといえる。

1. はじめに

南極ロス海の沿岸ビクトリアランドには広い露岩地帯があり，そこにはいくつかの東西にはしる谷が横たわっている。これらのいわゆるドライバレーで，掘削による国際共同研究 DVDP (Dry Valley Drilling Project) が，日・米・ニュージーランド三国で 1971 年からはじめられた。1973～1974 年および 1975～1976 年の両フィールド・シーズンに参加し，掘削試料の採集，地表調査，地表試料の採集を行った。

1973～1974 年シーズンには，ドライバレーの一つであるライト谷のバンダ湖で湖底堆積物の掘削 DVDP 4 が行われた。そして，基盤岩に達する全層堆積物の試料がえられた。著者の一人は掘削期間中現地において，試料の肉眼観察と試料採取をした。これらの試料と近辺の地表の析出鉱物などの安定同位体分析から，ライト谷やバンダ湖の過去に経てきた歴史を推察した (NAKAI *et al.*, 1975a, b)。

1975～1976 年シーズンに同じく著者の一人は DVDP に参加し，ドライバレーの歴史を追究する上で必要なロス海沿岸の地表調査を行った。そして，過去の環境変化の重要なかぎにぎる古海面に関する試料を採取し，安定同位体の立場から検討した。以下，DVDP 4 の掘削試料よりえた結論の概略と，それに関連するロス海沿岸の古海岸線の問題をのべる。

2. 試料の概要

バンダ湖はライト谷の東端海岸から約 50 km 西，標高 91～95 m に位置し，東西方向に長く 5.6 km，南北 1.4 km で，最深部の深度約 68 m とされている。この地方の平均気温は -20°C で，湖の表面は一年を通じて 3～4 m の氷でおおわれている。またライト谷は図 1 のように西はライトアッパー氷河，東はライトローアー氷河により閉じられている。この湖は塩分濃度が高く，特に底層水では海水の 3 倍以上にも達し (YAMAGATA *et al.*, 1967)，硫化水素の濃度が高く 78.6 mg/l にも達し (吉田他, 1971; NAKAI *et al.*, 1975 a, b)，水温は最深部で 25°C という特徴をもっている (TORII *et al.*, 1967; 吉田他, 1971)。

このバンダ湖の最深部 (深度 68.3 m) で DVDP 4 掘削が行われ，湖水表面よりの深度 80.7 m で基盤の花崗岩に到達した。この 11.2 m の掘削堆積物は粒度が比較的粗く sandy～silty，色は black～brownish yellow であった。この堆積物中には 2 カ所に氷河礫層があった。

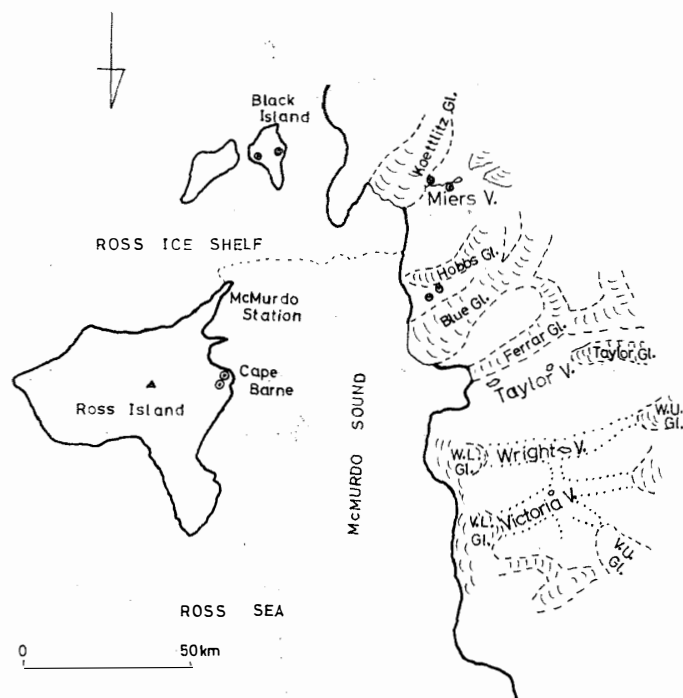


図 1 マクマード、ドライバレー地域の地図と試料採集地点

Fig. 1. Map of McMurdo Sound area, Dry Valleys and the sampling locations.

第1礫層は湖水表面から 71.8~72.3 m の間に、第2礫層は 75.3~77.1 m の間にみられた。また第1礫層以浅には数カ所に白色塩類の層状 concretion が 1~2 cm の厚さでみとめられた。これらの塩類は gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), thenardite (Na_2SO_4), calcite (CaCO_3) であることが確認された。この DVDP 4 掘削試料から堆積物と塩類を採取した。

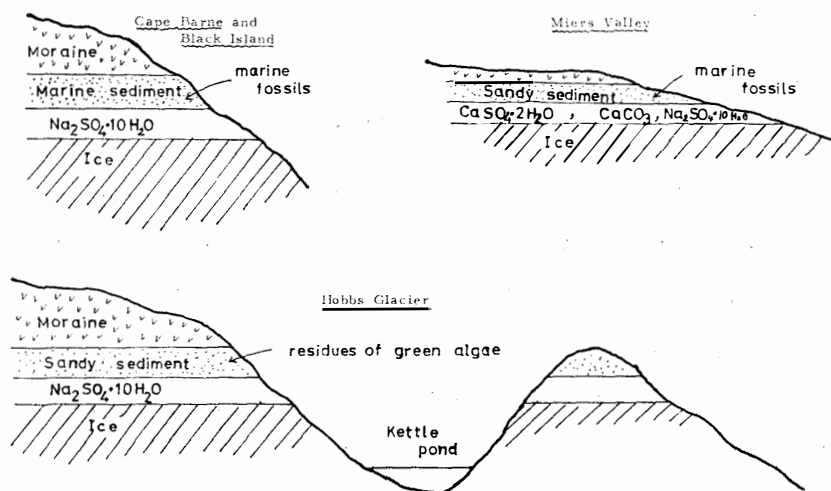


図 2 ロス海沿岸の硫酸塩鉱物の産状

Fig. 2. Occurrence of mirabilite and gypsum.

次に、ドライバレーのロス海マクマード海峡沿岸の地表調査と採取試料についてのべる。調査したのは図 1 に示したように、ロス島のバーン岬、ブラック島、大陸側ドライバレー沿岸のホップス氷河付近とマイヤーズ谷である。これらの地域では、低い所で標高 60 m、高い所で 150 m のモレーンの下に図 2 に示したように、硫酸塩鉱物である mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) が最高 1 m 近くの厚さで存在していた。その下部に接して厚い氷の層があり、その厚さは確認できないほど厚いものであった。また場所によっては、バーン岬のように mirabilite 層の上部に接して、砂質の海洋堆積物（海綿の骨片、貝化石を含む）が厚さ 30cm 程度で存在するものや、ホップス氷河近くのように、kettle pond と呼ばれるモレーンのくぼみにできた池の近辺にあるものでは、mirabilite 層の上には砂質の海洋と池底の混合堆積物（緑藻や海綿の骨片を含む）が、積み重なっているものもある。また、マイヤーズ谷のように石灰岩層の近くにある場合は、mirabilite が gypsum に変っているものなどがある。

いずれにしても、厚い硫酸塩鉱物層が標高 150 m の高所に存在すること、およびその起源を追究し明確にすることは、過去のドライバレーを探る上で興味あることである。そこで、これらの硫酸塩鉱物、氷、砂質堆積物を採取した。

3. 試料の分析

前項でのべたバンダ湖の掘削 DVDP 4 の堆積物試料中の thenardite, calcite, ロス海沿岸の mirabilite, gypsum 等の X 線粉末回折法による同定は、マクマード基地の地球科学研究室において、 $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の安定同位体の分析は帰国後行った。その他、氷の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を測定した。安定同位体比は標準物質の同位体比よりの千分偏差 (‰), $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ で表現し、標準物質としては硫黄は Canyon Diablo の troilite, 炭素は PDB, 酸素は SMOW を用いた。

4. 結果および考察

4.1. ライト谷とバンダ湖

バンダ湖の DVDP 4 掘削試料および湖水の安定同位体組成と、それらから導かれるこの地域の歴史に関しては、すでに詳細を報告 (NAKAI *et al.*, 1975 a, b) しているので、ここではその概略のみと、新しくえられた結果をのべるにとどめる。

現在のバンダ湖水の起源に関しては、湖水とこの地域周辺の氷河の $\delta^{18}\text{O}$ 値から、この地域の地表淡水すなわち氷河の融水であると結論された。それに対して塩類の起源は、海洋で

表1 バンダ湖 DVDP 4 掘削試料中の硫酸塩 concretion
の硫黄同位体組成
Table 1. $\delta^{34}\text{S}$ of gypsum concretion in Lake Vanda sediments.

Sample No.	Depth (m) *	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)
Bottom surface	68.3	+22.4
1-4	69.08	+20.9
6-a	69.48	+20.9
2-c	70.08	+20.4
7-5	71.17	+20.8

* Below lake surface.

あることが DVDP 4 掘削試料中の第 1 礫層以浅にのみみられる層状硫酸塩鉱物 concretion の $\delta^{34}\text{S}$ 測定結果から明らかになった。その一例として、表 1 に gypsum の値を示したが、すべて海水中の硫酸イオンと同一の値を与えた。また、層状で産しない硫酸塩鉱物の水による抽出によりえられた全層にわたる値も、+20.3 から +21.2% を示し、海水と同一であった。このようにバンダ湖は、水と塩類はちがった生い立ちであることが確認された。

次に、当然問題になるのは、バンダ湖が海洋から隔離され、陸水に変わりはじめた時期である。これを明らかにするために、掘削試料の塩分濃度の垂直変化をみると図 3 のようである。この硫酸塩含有量は SO_4^{2-} として 0.3~123 mg/g と大きく変動する。しかし、ここで注

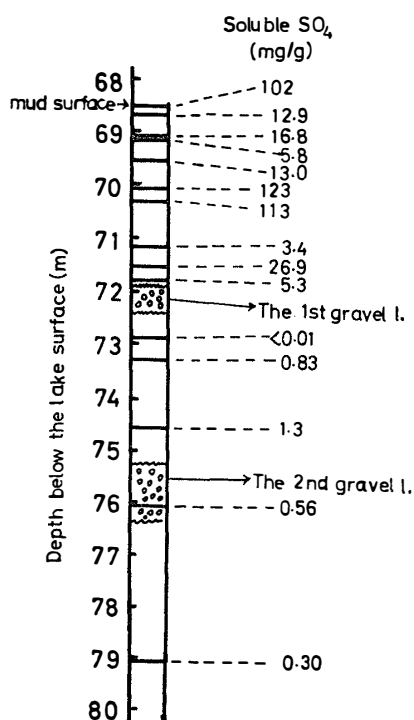


図 3 バンダ湖の堆積物中の硫酸塩鉱物の垂直分布
Fig. 3. Vertical distribution of sulfate minerals in sediments of Lake Vanda.

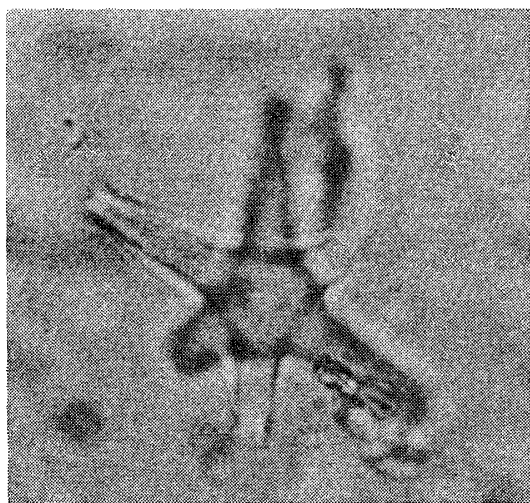
目すべきことは第1礫層を境目として、浅部と深部でははっきり含有量に差があることである。第1礫層以浅では明らかに硫酸塩含有量は多く、もしこれらが $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ であるとすると、gypsum としての含有量は 22% にも達する。これは、前述の第1礫層以浅にのみ硫酸塩 concretion が存在することからも当然のことであるが、掘削堆積物全層にわたり、すべての硫酸塩が海洋起源であることなどを総合すると、次のような結論がえられる。すなわち、最初はフィヨルドとして海水が現在のライト谷にはいりこんでいて、第1礫層が氷河活動により堆積した時期に海洋から隔離され、その後の海水の蒸発による塩類の析出、その後の温暖期の氷河融水の供給と、寒冷期の湖水の蒸発による塩類析出をくりかえし、現在のバンダ湖が形成されたと考えられる。この湖水の蒸発と、氷河水の供給のくりかえしについては、NAKAI *et al.* (1975 a, b) がのべているように、堆積物中の calcite の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ 値の垂直変化から証明された。すなわち、これらの値は表2に示したように、第1礫層以浅では上部に向かって増大しており、再結晶のくりかえしであることを物語っている。

ここでもう一つ問題がある。それは現在の標高が 95 m もあるライト谷やバンダ湖に実際に過去に海水がはいりえた時期があったかという問題である。そこで DVDP 4 の堆積物試

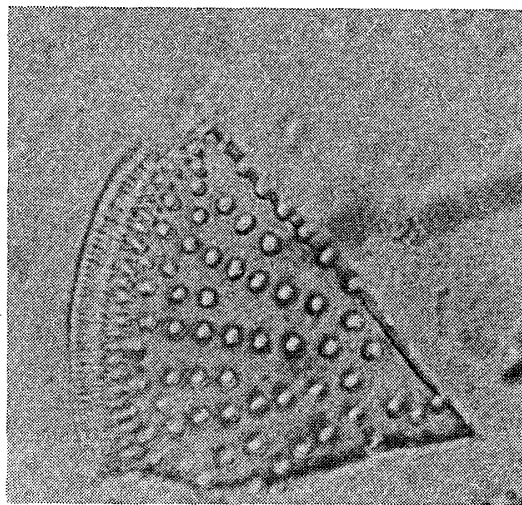
表2 バンダ湖 DVDP 4 掘削試料中の calcite の炭素および酸素同位体組成
Table 2. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of calcite from Lake Vanda sediments.

Sample No.	Depth (m)*	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Bottom surface	68.3	—	—
6-1	68.48	-3.5	+2.9
1-a	68.83	+10.4	+1.4
5-f	68.87	+10.8	+1.7
6-b	68.98	+11.4	+1.7
1-4	69.08	+11.6	+1.0
6-2	69.10	+10.3	+0.8
6-a	69.48	+10.3	+0.9
1-5	69.56	+4.4	+0.2
6-3	70.05	+1.9	+0.5
2-c	70.08	-5.3	-1.3
2-6	70.23	-4.2	-1.5
7-5	71.17	-9.3	+1.0
11-7	71.50	+0.3	+1.7
4-e	72.00	-7.6	-2.3
4-9	72.15	+6.4	-2.1
16-15	74.58	-10.6	+6.8

* Below the lake surface.



(a) 海綿の骨片
(a) *Sponge microclere*



(b) 珪藻 (海洋性)
(b) *Marine centric diatom*

図 4 DVDP 4 掘削試料中の海洋化石の顕微鏡写真

Fig. 4. Micrographs of marine fossils found in sediments from DVDP 4.

料中の化石の存在を確認することを試みた。そして、最近第 1 礫層以深にのみ、海洋化石の破片が存在するという新事実を見出した。この仕事はオーストラリアの H. BRADY 氏の協力によるものである。確認された *sponge microclere* と *marine centric diatom* の顕微鏡写真を図 4 (a), (b) に示した。BRADY (1974, 1975) が報告しているように、この地方の堆積物中の化石は相当の破壊をうけていて種の確認が難しい。しかし、第 1 礫層以深にだけ、海洋性の珪藻と海綿の一部が見出されたことは、重要な意味をもつものである。そして、第 1 礫層以浅には現在バンダ湖に生息する緑藻類の遺骸のみが見出された。この化石の事実から、過去は海であったことはさらに確かなものになってきた。

4.2. ロス海沿岸の塩類層と氷

前項でのべたように、ライト谷が過去海であったことの証拠が積み重ねられてきたが、さらに直接的な証明として、ドライバレーのロス海沿岸地域に過去の海水面に関する証拠を求めた。そして、硫酸塩鉱物の厚い層を最高 150 m の標高にまで見出した。Mirabilite の存在やその他の硫酸塩鉱物に関する鉱物学的な研究については、その一部地域について TORII *et al.* (1966), DORT *et al.* (1969) の報告がある。また、THOMPSON *et al.* (1956) によると、海水が極地のような低温で氷としてとりのぞかれる場合、mirabilite が最初に晶出する。今回ロス海沿岸の高所で採集したものは、ほとんどが mirabilite であることは、それらが海水起源であることを示唆しているといえよう。

表3 ロス海沿岸のモレーン下の層状硫酸塩鉱物の硫黄同位体組成と、それに伴う
水の酸素同位体組成

Table 3. $\delta^{34}\text{S}$ of layered sulfate minerals and $\delta^{18}\text{O}$ of the associated ice samples
found near the coast of McMurdo Sound, Ross Sea.

Location	Altitude (m)	$\delta^{34}\text{S}$ of surface mineral (‰)	Minerals	$\delta^{18}\text{O}$ of ice (‰)
Cape Barne				
Site 1-1	59	+20.7	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	- 7.6
Black Island				
Site 1	71	+19.1	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	- 9.5
Site 2	82	+20.0		- 9.5
Hobbs Glacier				
Site 1	85	+20.7	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-13.4
Site 2	82	+20.8		-25.2
Miers Valley				
Site 1N	150	+21.5	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	- 6.6
Site 2N	145	+21.0	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	- 8.3
Site G1	60	+21.0		- 7.9

まず、表3に採取した硫酸塩鉱物の $\delta^{34}\text{S}$ 値、氷の $\delta^{18}\text{O}$ 値、およびこれら鉱物、氷、堆積物層の存在していた高度を示した。これらの $\delta^{34}\text{S}$ 値をみると、+19.1~+21.5‰で、場所に関係なく一定の値をあたえており、しかも海水の SO_4^{2-} と全く同一の値である。また、この地域の現海水の硫酸イオンの $\delta^{34}\text{S}$ 値 (+19.8~+20.3‰) と一致する (中井他, 1976)。このように、これら硫酸塩鉱物は明らかに海洋起源のものであった。これら鉱物の $\delta^{18}\text{O}$ の測定は現在行いつつあり、さらに明確な証拠がえられるであろう。

次に、硫酸塩鉱物の下部にある氷の $\delta^{18}\text{O}$ の値をみてる。ホップス氷河付近の kettle

表4 マクマード地域の降雪、氷河、海水の酸素同位体組成

Table 4. Oxygen isotope compositions of snow, glacial ice and
sea water from the McMurdo area.

Location	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Location	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Snow		Sea water	
McMurdo Station	-32.4	DVDP 15 drilling site	
Lower Victoria Glacier	-34.7	30 m	+0.8
DVDP 15 drilling site	-30.4	60 m	+1.3
Mistake Peak	-37.5	90 m	+1.1
Glacier		120 m	+0.9
Lower Victoria Glacier	-30.3	Fishing hut	
Lower Wright Glacier	-32.9	10 m	+0.4
		490 m	+0.6

pond 近辺の氷以外は、 $-6.6 \sim -9.5\%$ でほぼ一定の値をとっている。表4にマクマードおよびドライバレー地域の雪、氷河氷、海水の $\delta^{18}\text{O}$ の測定値をあげた。これらを比較すると、硫酸塩鉱物の直下にある氷は氷河などの陸氷であるというよりも、むしろ海水に近い値を示している。これらの値が海水のそれらより、すこし小さくなっているのは、海水が表層の水を通して蒸発したためか、または氷河融水が混入したかの二つの原因が考えられる。このことから、氷は少なくとも大部分は海水起源といえる。ただ、ホップス氷河付近の氷だけが、ことなる $\delta^{18}\text{O}$ 値を示しており、ここには現在も kettle pond が数多く存在することから、最初は海水がトラップされ、それが徐々に氷河融水の混入により、陸水的な性格をもつようになったものと推測される。

以上のことから、過去に少なくとも 150 m にも達する古海岸線のあったことが確認された。

5. ま と め

以上のことから、ライト谷は過去に海であったことが多くの角度から証明された。そして、少なくとも 60 m から 150 m の現在の標高間を海水面が変動していたことが明らかになり、ライト谷のみでなく、テイラー谷もほとんどが海底であった時期のあったことを示した。

今後の残された問題として、(1) 海岸線の高さとその年代を決める必要がある。そして、氷期とドライバレーの歴史的関連性をつかむこと、(2) ロス海沿岸試料で産状が上部より堆積物、硫酸塩鉱物、氷の順になっているが、この層序の形成をいかに説明するか等々である。これらの問題については次の機会に報告したい。

終りに、試料採取にあたりご協力いただいた国立極地研究所神沼克伊助教授、東京工業大学工業材料研究所森川日出貴氏、メイン大学 G. DENTON 教授に心から感謝する次第である。

文 献

- BRADY, H. (1974): Diatoms from the Lake Vanda core. DVDP Bull., **3**, 181-184.
BRADY, H. (1975): Siliceous sponge material in DVDP 4 (Lake Vanda). DVDP Bull., **6**, 4.
DORT, W., Jr. and DORT, S. D. (1969): Antarctic sodium sulfate and recent geomorphic history. Antarct. J. U. S., **4**, 211.
NAKAI, N., WADA, H., KIYOSU, Y. and TAKIMOTO, M. (1975a): Stable isotope studies of salts and water from Dry Valleys, Antarctica. I. Origin of salts and water, and the geologic history of Lake Vanda. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **4**, 30-44.
NAKAI, N., WADA, H., KIYOSU, Y. and TAKIMOTO, M. (1975b): Stable isotope studies on the

origin and geologic history of water and salts in the Lake Vanda area, Antarctica. *Geochem. J.*, **9**, 7-24.

中井信之・水谷義彦・和田秀樹 (1976): 同位体組成よりみた南極ドライバレー地域の歴史の変遷. 日本地球化学会年会講演要旨集, 134-135.

THOMPSON, T. G. and NELSON, K. H. (1956): Concentration of brines and deposition of salts from sea water under frigid conditions. *Am. J. Sci.*, **254**, 227-237.

TORII, T., MURATA, S., YOSHIDA, Y., OSSAKA, J. and YAMAGATA, N. (1966): Report of the Japanese summer parties in Dry Valleys, Victoria Land, 1963-1965. I. On the evaporites found in Miers Valley, Victoria Land, Antarctica. *Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.)*, **27**, 1-12.

TORII, T., YAMAGATA, N. and CHO, T. (1967): Report of the Japanese summer parties in Dry Valleys, Victoria Land, 1963-1965. II. General description and water temperature data for the lakes. *Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.)*, **28**, 1-14.

YAMAGATA, N., TORII, T. and MURATA, S. (1967): Report of the Japanese summer parties in Dry Valleys, Victoria Land, 1963-1965. V. Chemical composition of lake waters. *Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.)*, **29**, 53-75.

吉田栄夫・由佐悠紀・森脇喜一・鳥居鉄也 (1971): 南極 Victoria Land の Dry Valley 調査報告. 1970-1971 年の Dry Valley 調査—地球物理学的研究を中心とした—について. 南極資料, **42**, 65-88.