

掘削試料の安定同位体組成からみたロス島の火山活動

中井信之*・水谷義彦*・和田秀樹*

Volcanic Events of Ross Island, Antarctica, Based on the Stable Isotope Studies of Drilled Volcanic Rocks

Nobuyuki NAKAI*, Yoshihiko MIZUTANI* and Hideki WADA*

Abstract: In 1973, DVDP 3 drill hole near McMurdo Station, Ross Island penetrated lava flows and pyroclastics composed of alkaline basalts and reached 381 m. The basal 214 m thick pyroclastic unit consists of basaltic hyaloclastites.

Cores contain permafrost ice as layers, filling the vesicles and cementing pyroclastics. Thenardite and calcite are also present mainly along the ice-rock interface. The origin of ice and salts was investigated using compositions of stable isotopes to disclose the volcanic events occurred in geologic time. For these purposes, δD , $\delta^{13}C$, $\delta^{34}S$ and $\delta^{18}O$ were measured using the above-mentioned samples.

The $\delta^{18}O$ of ice samples increases substantially with increasing depth, ranging from -35.3‰ near the ground surface to $+1.1\text{‰}$ at the bottom of the drill hole. $\delta^{34}S$, $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ values for thenardite and calcite can be divided readily into three groups according to their depth.

From the above results, the following conclusions can be obtained.

- 1) Basaltic hyaloclastites found at a depth of 200 to 381 m were erupted in the submarine volcanism.
- 2) Lavas and pyroclastics found at a depth of 100 to 200 m were formed under a subglacial and brackish condition, and have undergone strong hydrothermal alteration.
- 3) Samples from 0 to 100 m downhole were erupted in environment quite different from volcanic rocks beneath, suggesting subaerial flow or eruptions.

要旨: 1973年 DVDP 3 による火山岩の掘削が、ロス島のマクマード基地で行われ、その掘削深度は 381 m に達した。この掘削でえられた火山岩はアルカリ玄武岩類で、いくつかの lava flow と pyroclastic breccia であった。

これらのコア中に氷 (permafrost ice) と白色塩類 (主に thenardite と calcite) が存在し、それらの安定同位体比、すなわち δD , $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$, $\delta^{34}S$ を測定し、過去の火山活動の歴史を推察した。

* 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.

その結果、火山活動は3段階に分けられる。

- 1) 深度 200~381 m: 海底火山による噴出であった。
- 2) 深度 100~200 m: brackish または subglacial の環境での噴出で、特に酸化環境における強度の熱水作用を受けた特徴がある。
- 3) 深度 0~100 m: 1), 2) とはまったく異なる環境での噴出で, subaerial condition と考えられた。また地表物質の影響を大きく受けた特徴がある。

1. ま え が き

1971年以来、日・米・ニュージーランド三国共同の DVDP (Dry Valley Drilling Project) による掘削計画がはじめられた。その一つとして 1973~1974 年シーズンに、ロス海にある火山島のロス島マクマード基地で DVDP 3 が火山岩掘削のため行われた。ロス島にはエレバス山 (3,794 m), テラー山 (3,262 m), バード山 (1,766 m) 等の火山があり、エレバス山は現在も噴煙をあげている。著者の一人は、この掘削試料を現地で観察、採取する機会にめぐまれ、それら試料の安定同位体比の測定から過去の火山活動の歴史を推察することができた。

この DVDP 3 は到達深度 381 m にも達し、南極における現在までのこの種の掘削の最高記録を作った。以下、この掘削でえられた貴重な試料からの安定同位体比測定による結果を報告する。

2. 掘削試料の概要

DVDP 3 は表 1 に示したようにロス島のマクマード基地にある地球科学研究室の近くで行われた。ロス島自体鮮新世以後の火山活動により形成されたと言われており、主として basanite (ベイサナイト), trachybasalt (粗面玄武岩) 等のアルカリ岩系の火山岩で構成されている (GOLDICH *et al.*, 1975)。今回えられた DVDP 3 の掘削試料も、アルカリ玄武岩質の

表 1 DVDP 3 掘削記録
Table 1. Site data for DVDP 3 hole.

Drilling period	21 September to 19 October 1973
Position	77°50'59.59"S, 166°40'28.68"E
Elevation of drilling site	47.63 m
Total penetration	381.1 m
Total section cored	341.16 m
Temperature	-7.3°C at a depth of 270 m -16.9°C at a depth of 10 m

火山岩であった。

2.1. 噴出時期

DVDP 3 でえられた火山岩の噴出時期については、まだ直接絶対年代の測定は行われていないが、掘削地点周辺の地表岩石の K/Ar 年代が出されている。それによると、層序的に掘削試料の上部にあたる オブザベーションヒルの kaersutite phonolite (ケルスート角閃石響岩) の年令は、 1.18 ± 0.03 m.y. とされており (FORBES *et al.*, 1974), えられた火山岩は少なくとも 118 万年以前に噴出したものである。そのほか、掘削火山岩の残留磁気の測定から、地球磁場の反転期である松山期の噴出物であることが明らかにされている (McMAHON and SPALL, 1974)。KYLE と TREVES (1975) は 118 万年～116 万年以前の間の噴出らしいとしているが、少なくとも 118 万年より以前の松山期後期の噴出であると考えられる。

2.2. 掘削試料の産状

掘削でえられた火山岩は KYLE と TREVES (1974, 1975) による岩石学的な研究から、地表から 381 m の全柱状試料は 10 個の lava unit と 5 個の pyroclastic unit が識別されている。また、これらの岩石はアルカリ玄武岩系列に属し、下部から上部にむかって olivine-augite basalt hyaloclastite (玄武岩質ハイアロクラスタイト), olivine-augite basalt (カンラン石・普通輝石玄武岩), augite-kaersutite basalt (普通輝石・ケルスート角閃石玄武岩), hawaiiite (ハワイ岩, 中性長石玄武岩) の順に重なっている。そして、最下部にみられる pyroclastic zone は hyaloclastite で、その層は非常に厚く、深度 166.83 m 以深の約 214 m にも達している。ただし、深度 200 m 付近までは漸移的である。

この柱状試料で特徴的なことは、火山岩の間に、氷 (permafrost ice) と白色塩類が存在することである。すなわち、氷は火山岩の割れ目に層状またはレンズ状 (厚いものは 50 cm にも達する) に、また岩石の気孔、空隙 (直径 0.5～1 cm 程度) を埋める形で、また pyroclastic basalt や hyaloclastite をセメンティングする形で存在していた。ただし、360 m 以深には氷はほとんどない状態であった。

白色塩類はすべて、上記の氷と共存し、大部分は岩石と氷の境界近くに産した。これらの白色鉱物は、マクマード基地の地球科学研究室において、X線粉末回折分析法で同定を行い、硫酸塩鉱物として thenardite (芒硝石, Na_2SO_4), gypsum (石膏, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 炭酸塩鉱物として calcite (方解石, CaCO_3), dolomite (白雲石, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) であることを確認した。また、一部に zeolite (沸石) が見出されたが、主な鉱物は thenardite と

calcite であった。ここで注目すべきことは、深度 200～300 m の間には氷は存在するが、塩類析出物はまったく見られなかった。

以上の氷や塩類の存在は、極地などの寒冷地における特色であり、われわれは現地でこの特徴をつかみ、観察、分析、試料の採取を行った。

3. 研究対象と安定同位体比の測定

上にのべた塩類鉱物の X 線分析による同定と、氷および thenardite, calcite の安定同位体比を測定し、過去の火山噴出の環境変化の歴史を推察した。

氷試料に関しては、現地で気密な試料びんに採集し、帰国後それらの $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, D/H 比を、硫酸塩および炭酸塩鉱物に関しては $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を測定した。以下の議論では、安定同位体組成は常法に従い、それぞれの標準物質の同位体比からの千分偏差(‰)すなわち δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$ で表現する。その場合、標準物質として δD , $\delta^{18}\text{O}$ は SMOW, $\delta^{13}\text{C}$ は PDB, $\delta^{34}\text{S}$ は Canyon Diablo の troilite を用いた。

4. 結果と考察

4.1. 掘削試料中の永年氷の同位体組成

氷の $\delta^{18}\text{O}$ は採取した全層にわたる試料について測定し、その結果は表 2 に示した。その δD については、一部の試料の測定を行い、表 3 にその結果をあげた。酸素および水素の同位体組成は、地表から 381 m の深部にわたり大きく変動し、それぞれ $-35.3 \sim +1.1\text{‰}$, $-284 \sim +6.1\text{‰}$ をあたえた。

以下、これらの値を用いて、火山岩の噴出環境を推察するのであるが、まずその前に氷が岩石の噴出、固結時に取り込まれたものか否かが問題になる。そこで氷のうち気孔（径 0.5～1 cm 程度）を埋めているものは、固結時に取り込まれたものであることは明白であるので、それらと層状に産する氷の $\delta^{18}\text{O}$ を比較した。その結果は下の如くであり、両者はまったく一致したことから、これらの氷はすべて火山岩の固結時に包有されたものであるといえる。

深度 (m)	層状の氷の $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	気孔中の氷の $\delta^{18}\text{O}$ (‰)
179.60	-13.4	-13.0
111.75	-17.5	-16.9
262.25	-15.0	-15.1

表2 DVDP 3 (1973~74) 掘削試料中の氷の酸素同位体組成
 Table 2. Oxygen isotope composition of ice from DVDP 3 (1973-74).

Depth (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW, ‰)	Depth (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW, ‰)	Depth (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW, ‰)
11.39	-34.2	79.38	-19.5	196.83	-15.9
11.89	-33.8	87.96	-18.3	202.31	-20.5
15.65	-35.3	95.20	-18.4	206.70	-22.5
18.96	-34.6	99.93	-14.0	212.34	-23.4
20.50	-32.7	100.58	-16.2	216.67	-24.9
23.84	-28.5	100.80	-19.3	221.14	-20.3
52.78	-20.9	108.64	-17.3	227.58	-18.3
53.43	-20.5	111.75	-17.5	233.70	-18.1
55.78	-20.5	111.95	-17.4	237.16	-18.5
63.40	-20.4	118.71	-16.7	243.30	-20.0
63.56	-20.4	142.64	-16.0	248.89	-18.1
65.40	-19.0	145.48	-15.9	253.61	-14.4
70.22	-18.2	154.43	-14.6	262.25	-15.0
71.28	-16.8	162.67	-14.6	279.62	-15.7
71.92	-16.7	170.53	-14.4	314.90	-2.4
72.30	-17.3	174.77	-16.0	318.18	-2.1
74.72	-18.8	178.22	-14.4	330.10	+0.2
76.09	-18.7	179.60	-13.4	342.47	+1.1
76.45	-18.7	190.64	-14.3	376.93	-9.3
76.82	-19.1				

表3 DVDP 3 掘削試料中の氷の水素同位体組成
 Table 3. δD values of ice from DVDP 3.

Depth (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW, ‰)	δD (SMOW, ‰)
11.39	-34.2	-284
63.40	-20.4	-165
100.58	-16.2	-150
145.48	-15.9	-109
212.34	-23.4	-178
314.90	-2.4	-17.1
342.47	+1.1	+6.1

そこで、掘削試料についての考察を進めることにする。まず、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の垂直変化をみると図1のようになり、概観すると表層より深部にむかって増大してゆくことがわかる。最初に地表近くの値をみると、約 20 m 以浅では $\delta^{18}\text{O}$ は $-33 \sim -35\text{‰}$ でこの掘削試料中で最も小さい値で、しかもほぼ一定の値を示している。これらの値はこの地域、すなわちマクマード、ドライバレー地域の降雪、氷河、地表淡水の値（表4参照）と一致している（NAKAI *et*

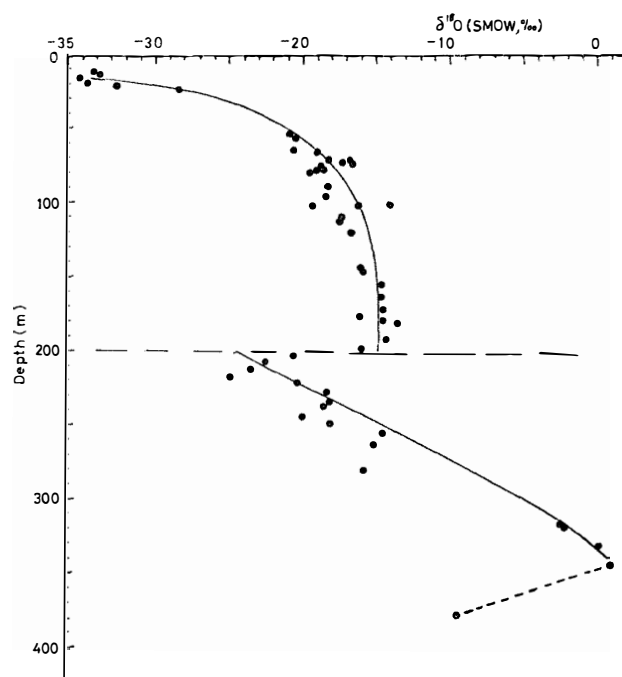


図 1 DVDP 3 掘削試料中の氷の $\delta^{18}\text{O}$ 垂直変化

Fig. 1. Vertical distribution of $\delta^{18}\text{O}$ values for permafrost from DVDP 3.

al., 1975). また, 一般的に DANSGAARD (1964) が示した年平均気温と降雨や降雪の $\delta^{18}\text{O}$ の関係からみても, 上の値は明らかにこの地方の地表水である. これと対照的なのは最深部付近 (330~350 m) の氷で, この掘削コア中で最も大きな $\delta^{18}\text{O}$ 値である $+0.2\sim+1.1\text{‰}$ を示した. この値は明らかに海水そのものであることを示している. また, このマクマード海峡の海水の $\delta^{18}\text{O}$ 値(表 4) とよく一致している. 以上のことから, 掘削試料中の氷は 20 m 以浅の地表淡水と, 深部の海水の二つの極端な起源をもつことがわかった. このことは, δD 値からもまったく同様の結論がえられる.

次に, 図 1 に示した氷の $\delta^{18}\text{O}$ 値の垂直変化をさらに詳しく眺めてみると, 深度 200m に大きな不連続が見られる. すなわち, 深度 200 m を境にして, 20 m の差で同位体組成が 10‰も異なっている. また, この不連続の上部にあたる深度 200~100 m の間はほとんど一定の値をとっている.

以上のことを総合して, 火山噴出の環境の相違から, 掘削岩を 1) 最深部 ~200 m, 2) 200~100 m, 3) 100 m ~地表の 3つのステージに分けることができる. 氷の同位体組成から推測される各ステージの火山活動は次の如くである.

1) まず最初は海底噴火ではじまり, その熱の供給によりロス海の氷棚が溶解し, 海水が

表4 マクマード地方の降雪, 氷河および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

淡水により希釈された環境に移行し, おそらく氷棚にぶつかったと考えられる. 淡水による希釈の度合を $\delta^{18}\text{O}$ 値から計算すると, 深度 200 m で海水と淡水の混合比は 3:7 である. この塩分濃度の希薄化への移行については, 深度 200~300 m の間に塩類析出物がみられないことともよく合致する. さらに, 前述のように, hyaloclastite の層は正確には 166.83 m 以深であるが, 深度 200 m 近くまでは漸移的で, むしろ 200 m 以深で hyaloclastite 層に

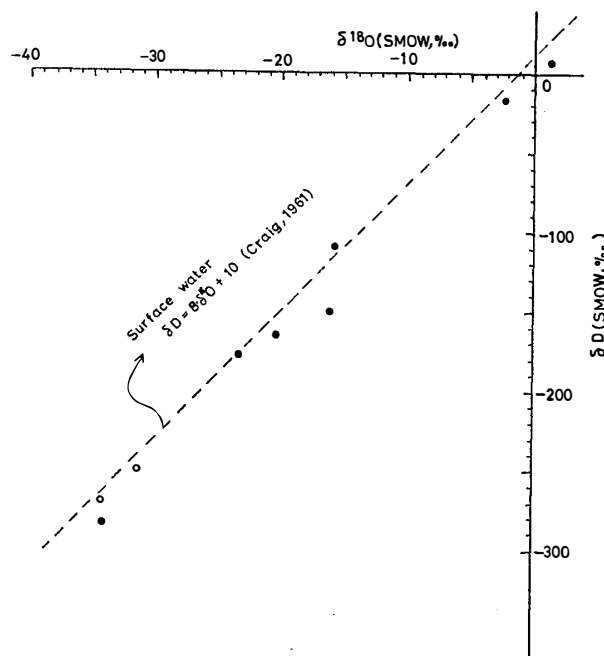


図2 DVDP3 掘削試料中の氷の δD と $\delta^{18}\text{O}$ の関係

Fig. 2. Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ values of permafrost from DVDP 3. The meteoric trend line is shown for comparison.

なると考えられることをつけ加えておく。

2) 次の噴出が、海水と淡水の混合比 3:2 のやや塩分濃度の高い環境ではじまり、ほとんど一定の環境で現在の深度 100 m まで続いた。

3) 100 m 以浅では地表の影響を強く受ける環境へと移行していった。

以上のことが氷の $\delta^{18}\text{O}$ の値から導かれたが、一つ重要なことはこれらの氷の同位体組成が、火山岩との同位体交換により変化していないかどうかを確かめておく必要がある。それを検討するために図 2 のように、氷の $\delta^{18}\text{O}$ と δD の関係をしらべた。その結果は図のように CRAIG (1961) のいう地表水の線に近く、むしろこの地域の地表水（淡水）と海水の点を結んだ線上にすべての点がプロットされ、同位体交換反応による酸素同位体組成の変化はなかった。このように、上の結論に無理のないことがわかったが、次に塩類析出物の同位体組成からさらに詳しい検討をした。

4.2 掘削試料中の鉱物の同位体組成

硫酸塩および炭酸塩鉱物が地表近くから最深部にわたり氷と共存するが、地表近くおよび 200~300 m の間にはほとんど見出せなかったことは前に述べた。これら鉱物の $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$,

表 5 DVDP 3 掘削試料中の硫酸塩鉱物の硫黄および酸素同位体組成
Table 5. Sulfur and oxygen isotope compositions of sulfate minerals in DVDP 3.

Depth (m)	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW, ‰)
18.96	+10.0	
20.16	+9.4	
103.93	+0.7	-5.1
110.74	-0.3	-6.3
111.35	-0.6	-6.0
116.52	+0.9	-7.4
117.61	+0.7	-6.6
127.90	-0.7	-6.5
130.02	+1.0	-5.4
147.83	-1.6	
150.02	-0.7	-6.2
181.96	+1.3	-5.3
317.48	+18.0	+10.6
327.98	+19.3	+10.8
335.76	+18.1	
361.32	+18.7	+9.8
370.60	+19.1	+9.8

$\delta^{18}\text{O}$ を測定した。

まず, thenardite の硫黄および酸素の同位体組成は表 5 のようになり, 深度により $\delta^{34}\text{S}$ は $-1.6 \sim +19.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ は $-7.4 \sim +10.3\text{‰}$ と大きく変動している. しかし, 4.1. でのべた深度別の噴出区分 ステージ 1)~3) にしたがって分類してみると, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$ 値共にはっきりした差がみとめられる. 1) の最深部 $\sim 200\text{ m}$ までのステージでは硫黄の同位体組成は $+18 \sim +19\text{‰}$, 酸素は $+10 \sim +11\text{‰}$ で, 明らかに海水起源であることを物語っている (LONGINELLI and CRAIG, 1967; RAFTER and MIZUTANI, 1967). 2) $100 \sim 200\text{ m}$ の深度では, 硫黄の同位体組成は非常に一定しており $0.0 \pm 1.5\text{‰}$, 酸素も同様に $-6.3 \pm 1.2\text{‰}$ である. これらの値から, この層の硫酸塩鉱物はマグマ中の一次硫化物 (SCHNEIDER, 1970) が, 酸化的な環境で熱水変質により生じたものであることを物語っている. この熱水作用が強かったと想像されることと, 酸化的な環境であったことは, この層の掘削火山岩が肉眼的に観察できるほど熱水作用の形跡を残している (KYLE and TREVES, 1974) ことと, 明らかに Fe_2O_3 が存在していたことから裏付けられる. 3) の地表近くでは, 塩類が少なく明白ではないが, 1) および 2) とは異なっている.

このように各ステージでの差異が認められたが, 特にステージ 1) と 2) では図 3 にしめ

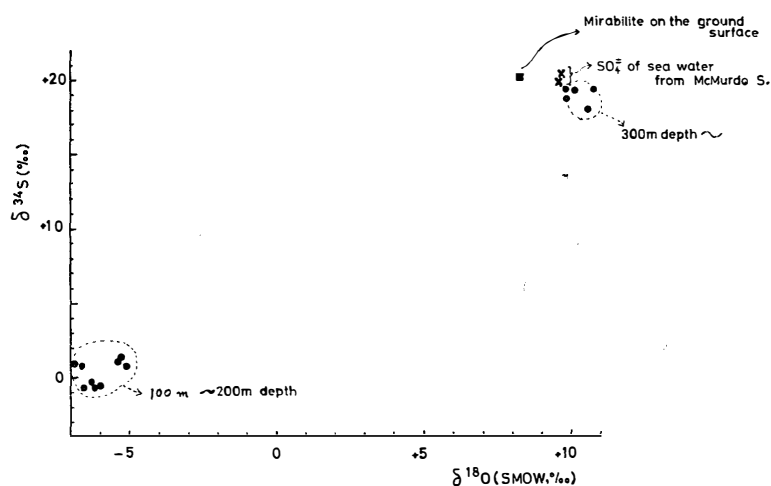


図 3 DVDP 3 掘削試料中の硫酸塩鉱物 (thenardite) の硫黄と酸素の同位体組成の関係
Fig. 3. Sulfur and oxygen isotopic compositions of Na_2SO_4 (thenardite) from DVDP 3, of SO_4^{2-} in sea water and of mirabilite from Cape Barne, Ross Island.

したように大きな差があり, ステージ 1) は海水と関連深かったことがわかる.

次に炭酸塩鉱物である calcite についてみると, これらの同位体組成から起源を論ずることはできないが, 表 6 にみられるように, ステージ 1) と 2) では明らかに $\delta^{13}\text{C}$ の値を異

表6 DVDP 3 掘削試料中の calcite の炭素および酸素同位体組成
 Table 6. Oxygen and carbon isotope compositions of calcite from DVDP 3.

Depth (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW, ‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB, ‰)
18.96	+ 9.5	+5.8
51.20	+17.8	-4.3
145.48	+16.7	+5.6
147.83	+18.0	+6.1
148.82	+14.9	+4.4
150.02	+15.6	+4.2
317.48	+14.5	-3.4
325.75	+9.2	-5.5
327.98	+16.4	-2.4
335.76	+15.9	-2.1
342.17	+16.8	-1.8

にしている。

以上で、掘削試料中の塩類析出物の同位体組成についてのべたが、4.1. でのべた氷の同位体組成からえられた噴出活動の変遷とまったく同じ結論をえたのである。ただ、硫酸塩鉱物の検討結果からは、2) 200~100 m 層が酸化的熱水作用を強く受けたという新しい事実がみちびき出されたといえる。

4.3. 同位体交換平衡温度の推定

硫酸塩鉱物および炭酸塩鉱物と水の間の酸素同位体の分配から、それらが同位体交換平衡にあったと仮定して、平衡温度を推算してみた。この場合、水の $\delta^{18}\text{O}$ 値は、鉱物と共存する氷の値を用いた。硫酸塩鉱物—水系の温度スケールは、MIZUTANI と RAFTER (1969) によるものを、炭酸塩 (calcite)—水系に関しては O'NEIL と CLAYTON (1964) によるものを用いた。その推算温度は表7に示した。

表からみられるように、先にのべた噴出のステージ 1), 2), 3) について、それぞれ異なる温度が算出された。硫酸塩鉱物による温度は 1) の最深部で 140~160°C, 2) の 200~100 m 層で 160~210°C の値がえられた。この温度は、むしろ最低温度を示すものであるが、ステージ 2) は 1) より高温度をあたえている。このことはステージ 1) が海底噴出で、2) は熱水作用の強い時期であったことを意味している。さらに炭酸塩鉱物による温度は、dolomite を含む試料を除いて、深部より浅部に向かって、120°C から一様に降下してゆく傾向がある。ステージ 1) の層では 110~120°C, 2) では急激に温度がさがり 9~14°C を

表7 DVD P 3 掘削試料における $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$, $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 系の
酸素同位体平衡温度

Table 7. Isotopic temperature calculated from oxygen isotopic fractionations
of $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ pairs in DVD P 3.

Depth (m)	$\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$		$\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$	
	$\Delta\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ (‰)	Isot. temp. (°C)	$\Delta\text{Cal.-H}_2\text{O}$ (‰)	Isot. temp. (°C)
18.96			45.0	-30 Cal.
51.20			40.7	-21 Cal.
103.93	11.1	160 Th.		
110.74	9.9	180 Th.		
111.35	10.2	175 Th.		
116.52	8.2	211 Th.		
117.61	9.0	195 Th.		
127.90	8.6	205 Th.		
130.02	9.7	185 Th.		
145.48			32.2	9 Cal.
147.83			33.5	6 Cal.
148.82			30.4	17 Cal.
150.02	8.9	200 Th.	31.1	14 Cal.
181.96	9.8	185 Th.		
317.48	12.6	140 Th.	16.5	110 Cal.
325.75			10.2	200 Dol.+Cal.
327.98	11.2	160 Th.	15.9	120 Cal.
342.17			15.8	120 Cal.

Th.: Thenardite, Cal.: Calcite, Dol.: Dolomite

示し、浅い方に向かってやや降下している。3) については異常に低い温度をあたえ、地表物質の二次的な混入を考えざるをえない。これらの温度は CaCO_3 が析出した時の温度を示していると考えられる。いずれにしても、ステージ 1) と 2) の間で急激な環境変化のあったことは明らかである。

5. ま と め

以上のように、掘削試料中に含まれる水、塩類析出物の安定同位体組成から火山岩噴出の環境の変化を追跡したが、まとめてみると次のようになる。

1) このロス島形成に関係した第四紀(松山期の後期)の、現在より約 120 万年以前の火山活動は、最初の海底噴出であった。その後、ロス氷棚の溶解により連続的に淡水が混合し、低塩分濃度の環境への噴出に移行し、現在の深度 200 m まで続いた。

- 2) その後、次の噴出が汽水的な環境ではじまり、ここでは酸化的熱水期を経過し、現在の深度 100 m まで比較的不変の環境を保った。
- 3) 100 m 以浅では、明らかに地表物質の影響を受ける環境になり、徐々に純淡水環境、すなわち陸氷や積雪と関係をもつような環境に変わった。

文 献

- CRAIG, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702–1703.
- DANSGAARD, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**, 436–468.
- FORBES, R. B., TURNER, D. L. and GARDEN, J. R. (1974): Age of trachyte from Ross Island Antarctica. *Geology*, **2**, 297–298.
- GOLDICH, S. S., TREVES, S. B., SUHR, N. H. and STUCKLESS, J. S. (1975): Geochemistry of the Cenozoic volcanic rocks of Ross Island and vicinity, Antarctica. *J. Geol.*, **83**, 415–435.
- KYLE, P. R. and TREVES, S. B. (1974): Geology of DVDP 3, Hut Point Peninsula, Ross Island, Antarctica. *DVDP Bull.*, **3**, 13–48.
- KYLE, P. R. and TREVES, S. B. (1975): DVDP 1, 2 and 3, Hut Point Peninsula—a review (abs.). *DVDP Bull.*, **6**, 16.
- LONGINELLI, A. and CRAIG, H. (1967): Oxygen-18 variations in sulphate ions in sea water and saline lakes. *Science*, **156**, 56–59.
- MCMAHON, B. and SPALL, H. (1974): Results of paleomagnetic investigation of selected cores recovered by the Dry Valley Drilling Project. *DVDP Bull.*, **4**, 37–38.
- MIZUTANI, Y. and RAFTER, T. A. (1969): Oxygen isotopic fractionation in the bisulphate ion—water system. *N. Z. J. Sci.*, **12**, 54–59.
- NAKAI, N., WADA, H., KIYOSU, Y. and TAKIMOTO, M. (1975): Stable isotope studies on the origin and geological history of water and salts in the Lake Vanda area, Antarctica. *Geochem. J.*, **9**, 7–24.
- O'NEIL, J. R. and CLAYTON, R. N. (1964): Oxygen isotope geothermometry. *Isotopic and Cosmic Chemistry*, ed. by H. CRAIG *et al.*, North Holland, 157–168.
- RAFTER, T. A. and MIZUTANI, Y. (1967): Preliminary results on oxygen isotopic variation in sulphates and the relationship to their environment and to their $\delta^{34}\text{S}$ values. *N. Z. J. Sci.*, **10**, 816–840.
- SCHNEIDER, A. (1970): The sulfur isotope composition of basaltic rocks. *Contr. Mineral. Petrol.*, **25**, 95–124.