

南極ドライバレー地域の塩類析出物について

西 山 孝*

Studies on Evaporite Minerals from Dry Valley, Victoria Land, Antarctica

Takashi NISHIYAMA*

Abstract: The areal and vertical distributions of evaporite minerals in the Taylor Valley and the Wright Valley were studied with X-ray diffraction techniques to disclose the origins of salts. Halite, sylvite, thenardite, mirabilite, gypsum, calcite, aragonite, trona, thermonatrite, monohydrocalcite, soda niter, bloedite, and drapskite were identified in specimens on the ground surface, and calcite, fluorite, laumontite, chabazite, antarcticite, and chlorite in core samples.

In general, carbonate minerals predominate in the Taylor Valley, while sulphate minerals, except thenardite, predominate in the Wright Valley. Halite and thenardite are widespread in both areas. Trona, thermonatrite, and monohydrocalcite are found exclusively in the eastern Taylor Valley, and soda niter, bloedite, and drapskite in the Wright Valley. There is a general trend for sulphate minerals to be concentrated in elevated areas, and carbonate minerals in low areas.

From a comparison of the distribution of these salts and the chemical composition of lake water in the area, it seems that the main sources of salts distributed in the Taylor Valley and the Wright Valley are of marine and/or wind-transported origins, and that based on the nature of minerals from core samples, a small amount of salts is formed from hydrothermal solution.

要旨: ドライバレーに産出する塩類析出物について、X線回折分析法により鉱物の同定を行い、水平的および垂直的な分布の相違を検討した。同定された鉱物は、地表からの試料では炭酸塩5種、硫酸塩5種、硝酸塩2種、ハロゲン化物2種で、ボーリングコアからの試料では炭酸塩1種、沸石2種、ハロゲン化物2種、緑泥石1種であった。これらの塩類析出物は産出個所により異なり、一般に炭酸塩はテイラー谷に、硫酸塩はライト谷に多い傾向があり、とくに炭酸ソーダ石、サーモナトライト、モノハイドロカルサイトの産出がテイラー谷の海岸に近い部分に限られていること、チリ硝石、ダブルスカイト、プレーダイトがライト谷にのみ晶出していることは顕著な特徴であった。次に塩類析出物の分布と湖水の化学成分とを比較検討した結果、一部には熱水起源と考えられる塩類析出物もあるが、多くの塩類の起源は海水あるいは風送塩によるものと推察された。

* 京都大学工学部資源工学科. Department of Mineral Science and Technology, Faculty of Engineering, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606.

1. は じ め に

南極大陸のなかで、もっとも広い露岩地帯の一つとして、ドライバレーは古くから有名である。この露岩地帯には、中緯度の砂漠にみられるような数多くの塩類析出物が晶出している。

著者は、1974年10月から1975年1月まで、マクマード基地に滞在し、この塩類析出物の鉱物種および産状について、X線回折分析法によって検討した。その結果、同定された鉱物は、岩塩、加里岩塩、芒硝石、硫曹鉱、石膏、方解石、霰石、重炭酸ソーダ石、サーモナトライト、モノハイドロカルサイト、濁沸石、菱沸石、螢石、緑泥石、南極石、チリ硝石、ブレードイト、ダラブスカイトであった。次に、これらの鉱物の分布を調べると、産出個所の標高によって、谷によって、あるいは海岸からの距離によって、晶出している鉱物の種類あるいは量が異なっていることがわかった。さらに、これらの相違とこの地域にみられる湖水の化学成分とを比較したところ、ドライバレーの塩類析出物の起源について、いくつかの興味ある事実が明らかとなったので、これらについて報告する。なお、X線回折分析により同定された鉱物の中には、産出のまれな鉱物や極地の気象条件を反映して、常温では不安定な鉱物も含まれている。しかし本報告では方解石、岩塩など量的に多い鉱物を主として扱い、稀産鉱物については、稿を改めて論じたい。

2. 試料採取位置と産状

ドライバレーは、南北 80 km、東西 60 km で、北からビクトリア谷、ライト谷、テイラー谷の三つの大きな東西に走る U 字谷からなっている。氷におおわれた尾根はなだらかで、この尾根からいくつかの氷河が谷に張り出している（図 1）。調査した地域は、地表ではライト谷の上流とテイラー谷の全域、そしてボーリングコアーではライト谷のドンファン池からのコアー（DVDP 13）である。地表から採取した試料は約 400 個で、野外観察から試料は三つのタイプに区別される。まずタイプ 1 は、地上で小石の表面に白く散点状に晶出し、ほとんどが方解石からなっているもの（図 2B, D）。タイプ 2 は、モレーンの中にできたプールが干上がったところにしばしばみられ、白い粉状で、強い風が吹くと容易に移動するもの。鉱物種としてはテナルダイトやサーモナトライトなどが多い（図 2C, F など）。次にタイプ 3 は、小石の下に晶出しているもので、とくに構造土の溝の部分に多くみられる。したがってこの種の塩類の析出には、流水が大きな役割を果していると考えられる（図 2K）。鉱

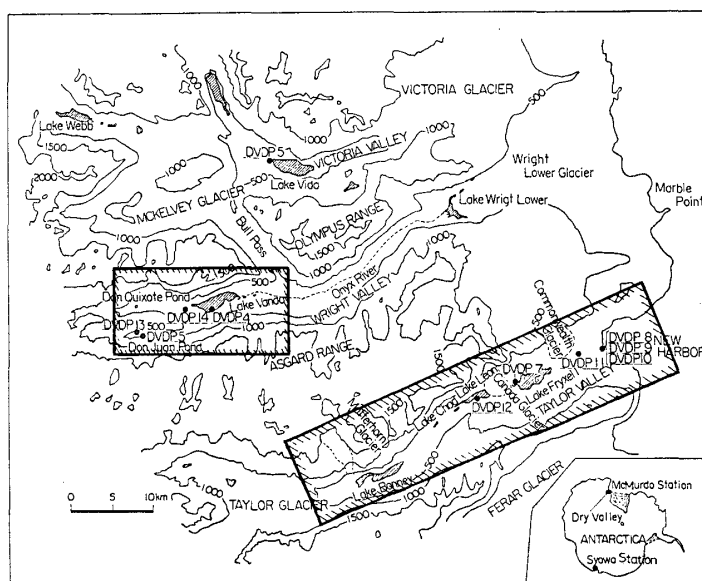


図 1 ドライバレーの地形概念図と調査地域

Fig. 1. Topographic map of Dry Valley region showing the Taylor Valley and the eastern part of the Wright Valley, and the location of drill sites.

物種は黄褐色の方解石が大半で、このタイプの方解石はタイプ1の方解石に比べると、一般に結晶性が悪い。一方、コアの試料では、どのボーリングコアにも塩類析出物が含まれているわけではなく、1974～1975のシーズン(DVDP 10～14)中では、塩類析出物が認められたのはドンファン池からのコアのみであった。形状は、基盤岩中では岩石の割れ目をフィルム状または脈状に充てんしており、また一部の湖底堆積物中にも塩類析出物が含まれている。

3. X線粉末回折分析

塩類析出物の分布状態を調べるために、採取した試料について、X線回折分析法によって鉱物の同定を行った。テイラー谷およびコアからの試料については、マクマード基地で、ライト谷からの試料については、京都で、いずれも常温で分析した。

現在までに同定された鉱物は、造岩鉱物を除くと、炭酸塩5種、硫酸塩5種、硝酸塩2種、ハロゲン化物4種、沸石2種、緑泥石1種で、これらの他に、まだ同定中の鉱物が数種ある。

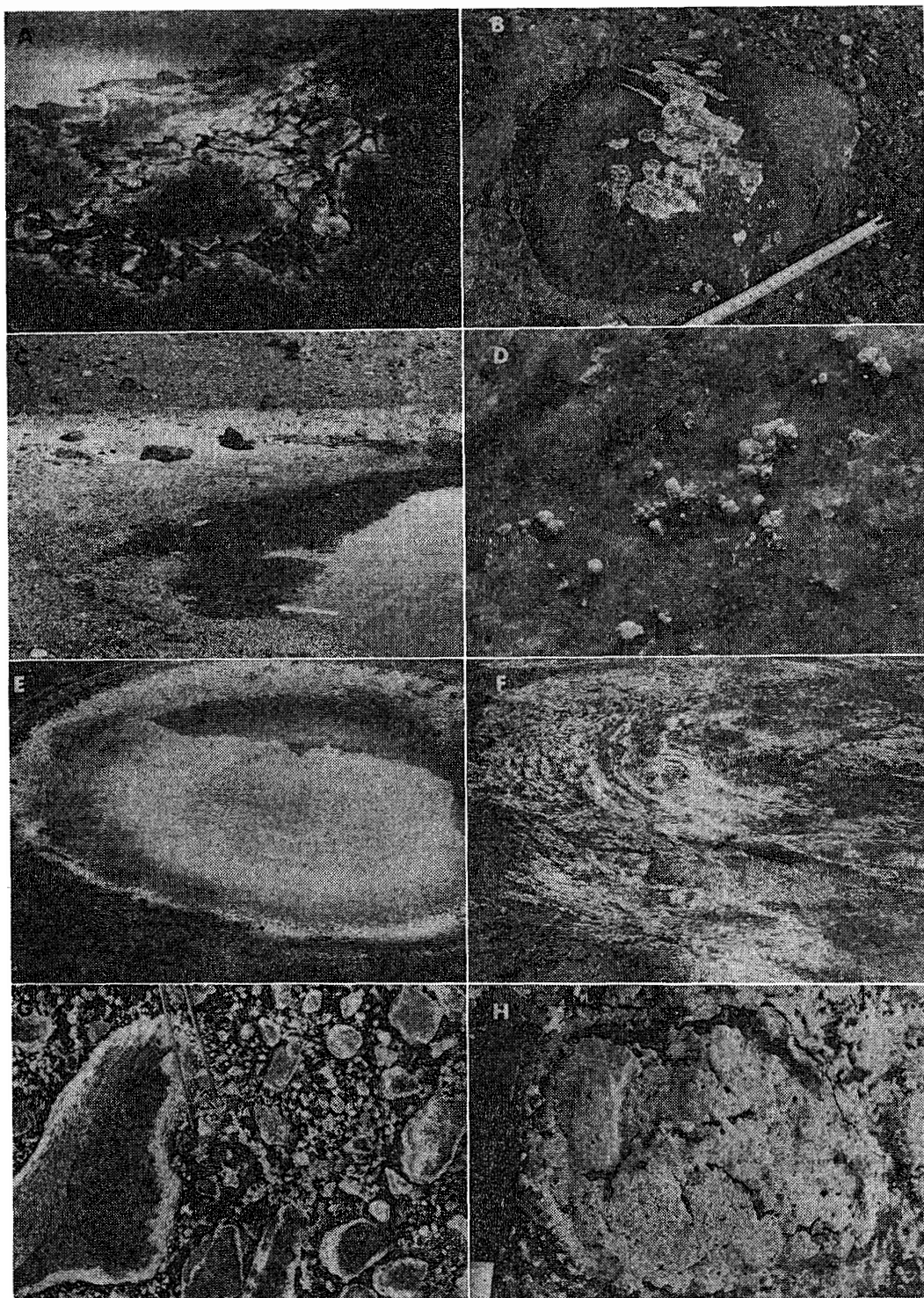
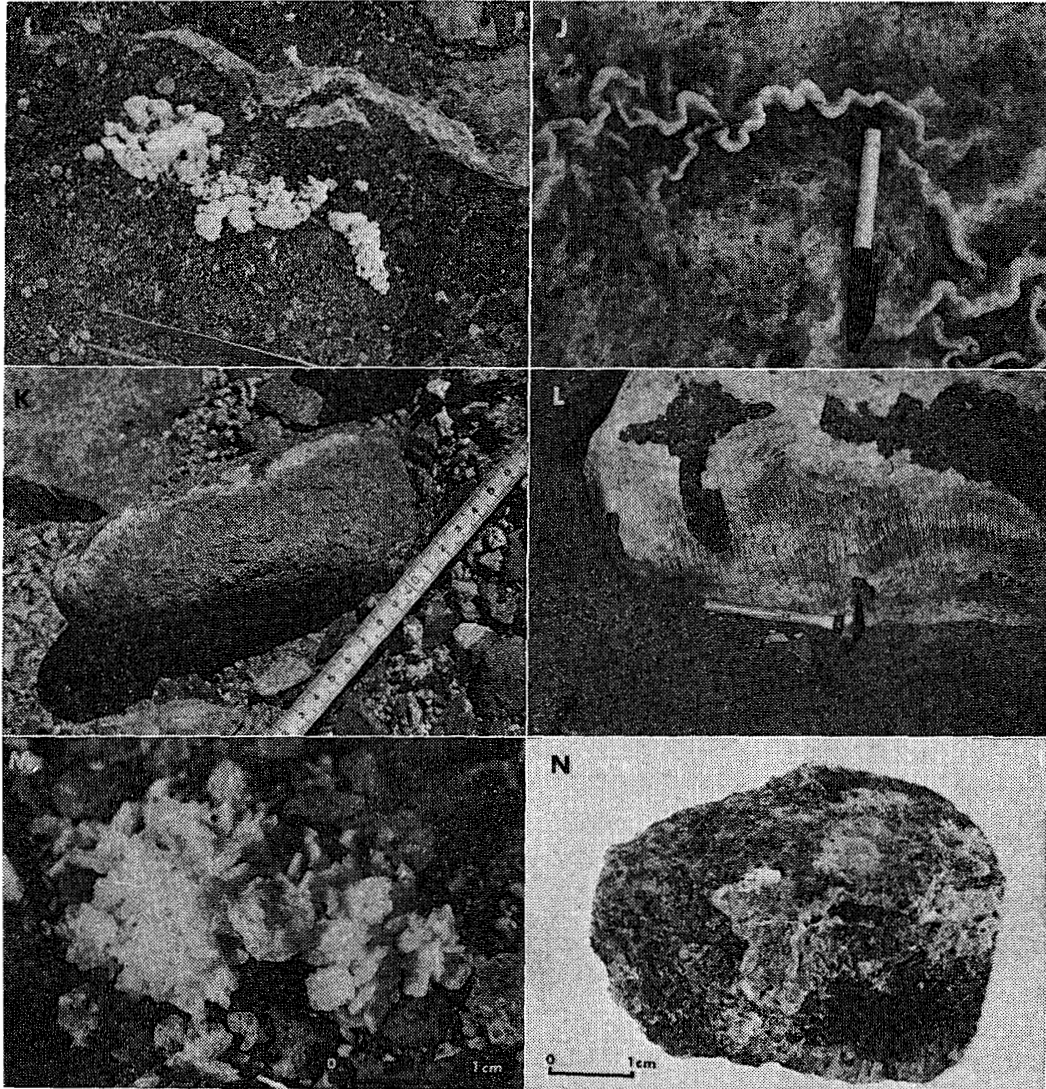


図 2 塩類析出物

Fig. 2. Evaporite minerals observed at the Taylor Valley and the eastern part of the Wright Valley.

- (A) テイラー谷下流部の塩類析出物(白い部分). ヘリコプターより撮影
(B) 石の表面に晶出している方解石 (タイプ 1)



- (C) 湖岸にみられる塩類析出物 (タイプ 2, コモンウェルス氷河の近く)
- (D) 葡萄状構造をした方解石 (タイプ 1, レオン湖の近く)
- (E) 池の周辺および中に晶出している塩類析出物 (池の直径は約 2 m, ドンファン池の近く)
- (F) プールの干上がったところにみられる重炭酸ソーダ石とサーモナトライト (タイプ 2, コモンウェルス氷河の近く)
- (G), (H) モレーンの表面にみられる塩類析出物 (タイプ 2, テイラー谷)
- (I) 重炭酸ソーダ石とサーモナトライトの共生からなる塩類析出物 (タイプ 2, コモンウェルス氷河の近く)
- (J) ドンファン池の周辺の岩塩
- (K) 石の裏に晶出した褐色の方解石 (石の上下は逆になっている. タイプ 3)
- (L) かつて湖底に堆積したと考えられる搔痕のある霰石
- (M) ライト谷のノースフォークに産出する石膏の結晶
- (N) ドンファン池からのボーリングコア (14.05 m, フィルム状に方解石と螢石が含まれている)

4. 地表にみられる塩類析出物の分布

塩類析出物の水平的および垂直的な分布を検討すると次の通りである。

4.1. 水平的な分布の相違

炭酸塩：炭酸塩を含む鉱物には、方解石 (CaCO_3)、霏石 (CaCO_3)、重炭酸ソーダ石 ($\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、サーモナトライト ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、モノハイドロカルサイト ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) がみられる。これらの鉱物の採取位置と産状を図3 A, B のようになる。図3からわかるように、全般的に炭酸塩鉱物は、ライト谷に少なく、テイラー谷に多い傾向がある。なかでも目立った現象は、重炭酸ソーダ、サーモナトライトの分布が、テ

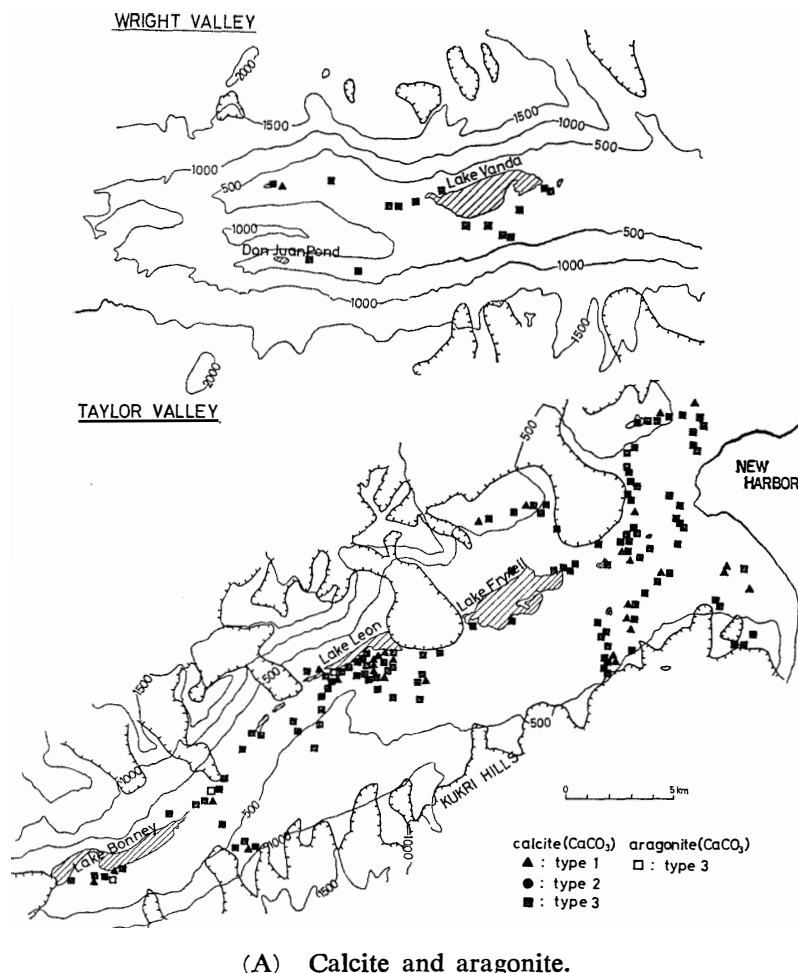


図3 (A-E) テイラー谷およびライト谷上流における塩類析出物の分布

Fig. 3(A-E). Distribution of evaporite minerals.

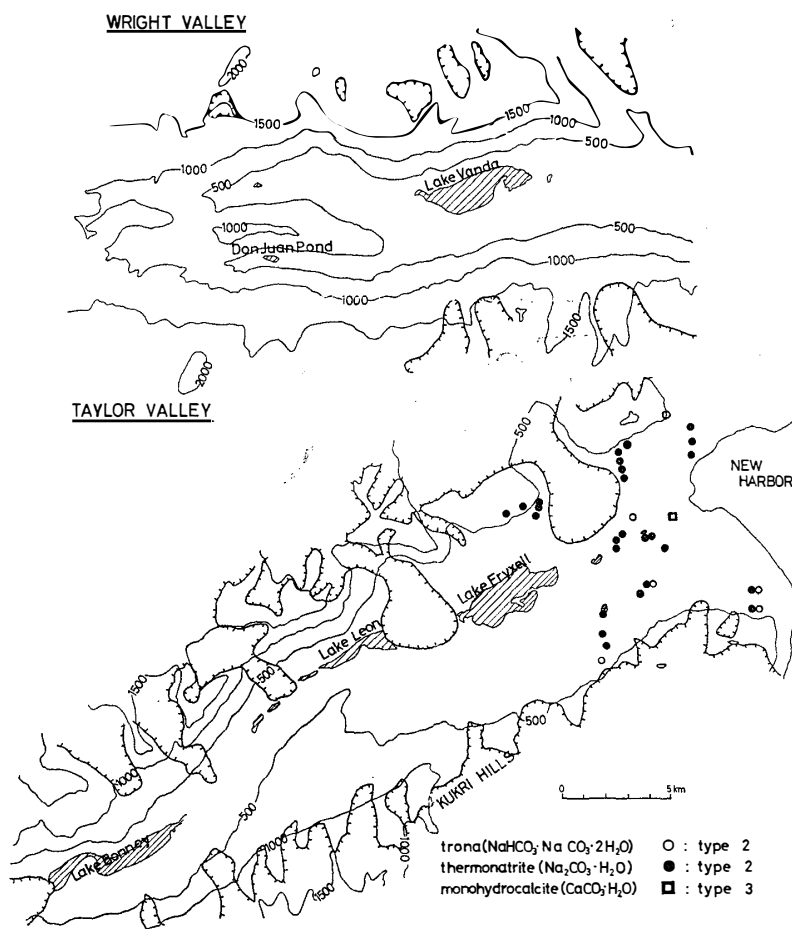


図 3 (B) Trona, thermonatrite and monohydrocalcite.

イラー谷のニューハーバーの海岸に近い部分のみに限られていることである。霰石はテイラー谷の上流で、かつ谷の底部からの 3 試料に含まれていたが、図 2 L からもわかるように表面に搔痕がみられ、他の塩類鉱物よりも古い時期に析出したと考えられる。

硫酸塩：硫酸塩鉱物としては、石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、芒硝石 (Na_2SO_4)、硫曹鉱 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)、プレーダイト ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、ダラブスカイト ($\text{Na}_3(\text{NO}_3)(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$) の 5 種が検出された (図 3 C, D)。芒硝石は、ライト谷、テイラー谷のいたるところにみられ、炭酸塩鉱物に比べると、地域による差は顕著ではない。また芒硝石は最初、硫曹鉱として沈澱し、その後、漸次結晶水を失って芒硝石になると考えられ、この現象は野外でもしばしば観察される。一方本実験では、試料採取後かなり時間が経過した後に分析しているので、芒硝石と硫曹鉱とを厳密に区別することはできない。そこで図 3 C では、硫曹鉱も芒硝石としてまとめて記載した。次に石膏の分布をみると、いずれの谷にも産出するがライト谷により濃集している。プレーダイト、ダラブスカイトについては、図 3 D からわかるよう

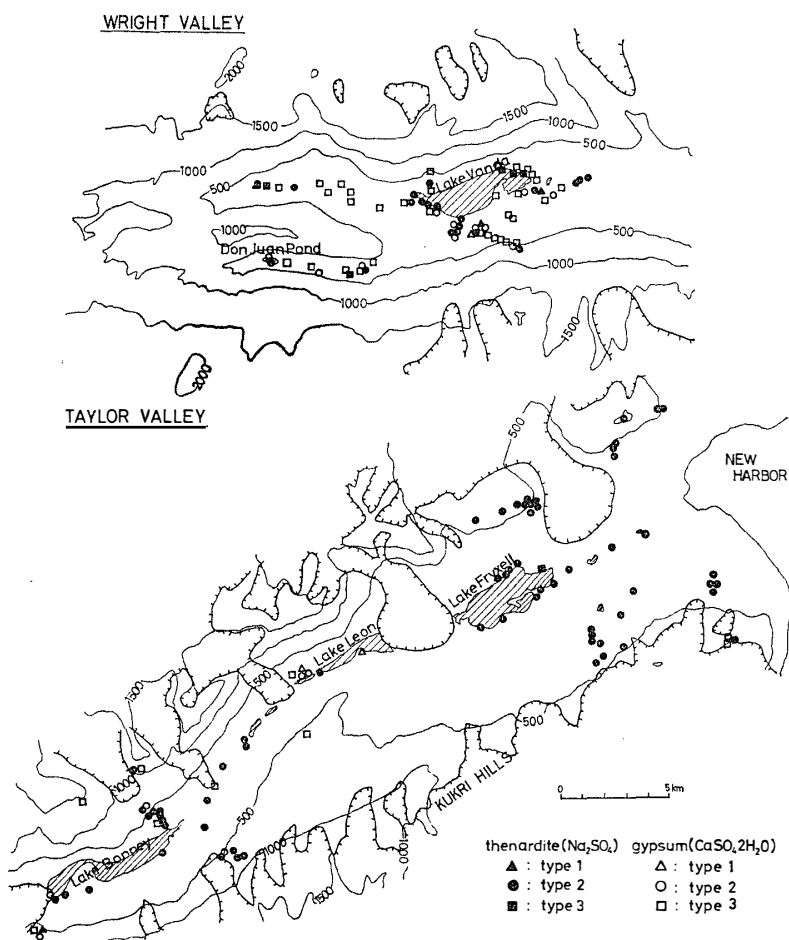


図 3 (C) Thenardite and gypsum.

に、両鉱物とも 4 試料から検出され、分布はライト谷のドンキホーテ池、バンダ湖の南の地域に限られている。なお従来の研究でドライバレーからの産出が知られている瀉利塩 ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) については、現在までのところ同定された試料はない。

硝酸塩：硝酸塩鉱物として、チリ硝石と上記のダラブスカイトがあるが、分布はいずれもライト谷のドンキホーテ池とバンダ湖周辺に限られている。

ハロゲン化物：地表からの試料中に認められたハロゲン化物には、岩塩 (NaCl) とカリ岩塩 (KCl) とがある。岩塩はもっとも普遍的に分布し、かつ量も多い鉱物で、湖岸にそって多量の産出がみられる。カリ岩塩はテイラー谷の中流部に 5 試料、ライト谷バンダ湖畔に 1 試料産出し、つねに岩塩と共生している。

4.2. 垂直的な分布の相違

テイラー谷について、上流部、中流部、下流部の 3 カ所で断面図を作成し、高度による塩

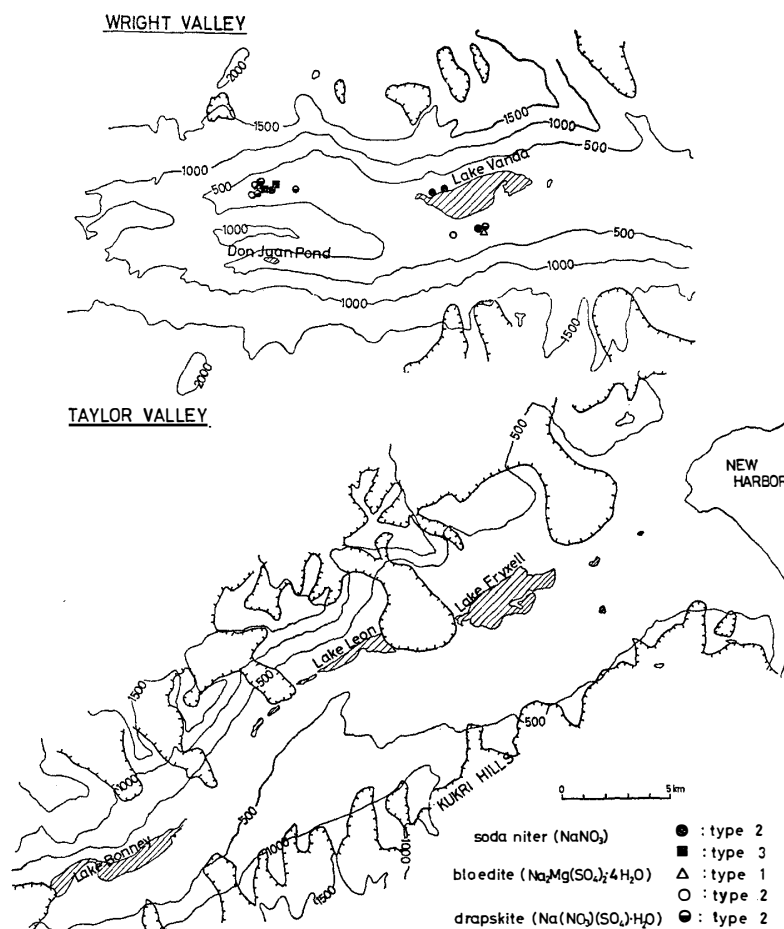


図 3 (D) Soda niter, bloedite and drapskite.

類析出物の分布状態を調べた(図 4)。その結果、下流部と中流部では、標高の高いところに硫酸塩鉱物が濃集し、低いところに炭酸塩鉱物(方解石を除く)が濃集する傾向がある。しかし、上流部になると、この傾向は明瞭ではない。

5. コアからの塩類析出物

ドンファン池のボーリングは、掘進深度 75 m で、そのうち上部から 13 m が堆積物、残り 62 m が基盤岩であった。この基盤岩のクラックに晶出していた 50 個余りの試料について分析を行った。同定された鉱物は、図 5 のように方解石がほとんどで、他に螢石 (14.05 m)、菱沸石 (44.75 m など)、濁沸石 (37.05 m など)、南極石 (56.60 m, 56.72 m)、緑泥石 (62.62 m) が認められた。また堆積物中では、上部から 2 m のところに石膏の層がみられる。なお南極石については、BROWNE (1973) が述べているようにボーリングの潤滑水か

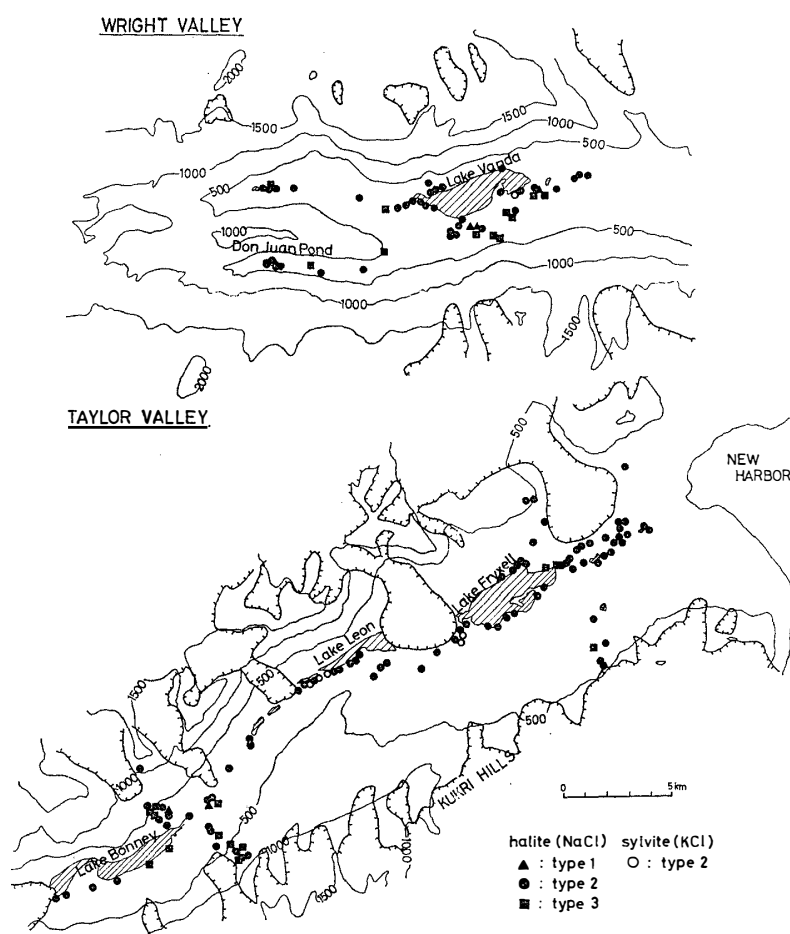


図 3 (E) Halite and sylvite.

ら形成されたことも考えられる。

6. 考 察

ドライバレー地域に塩類析出物がみられることは、同地域の塩湖の存在とともに注目されてきた。とくに塩類の起源については、海水起源、風送塩、熱水起源、岩石の風化によるものなどがあり、それぞれの立場から検討されてきている。そこで本研究によって明らかにされたいいくつかの事実に基づいて、塩類析出物の起源について考察した。

従来のドライバレーにおける湖水の化学成分についての研究 (YAMAGATA *et al.*, 1967 など) によると、湖水のカチオンおよびアニオンの割合は図 6 のようになっている。すなわちカチオンについては、ライト谷のバンダ湖とドンファン池で Ca^{++} が、テイラー谷とボニー湖で Mg^{++} と Na^+ が、フリクセル湖で Na^+ が多くを占めている。アニオンでは Cl^- が

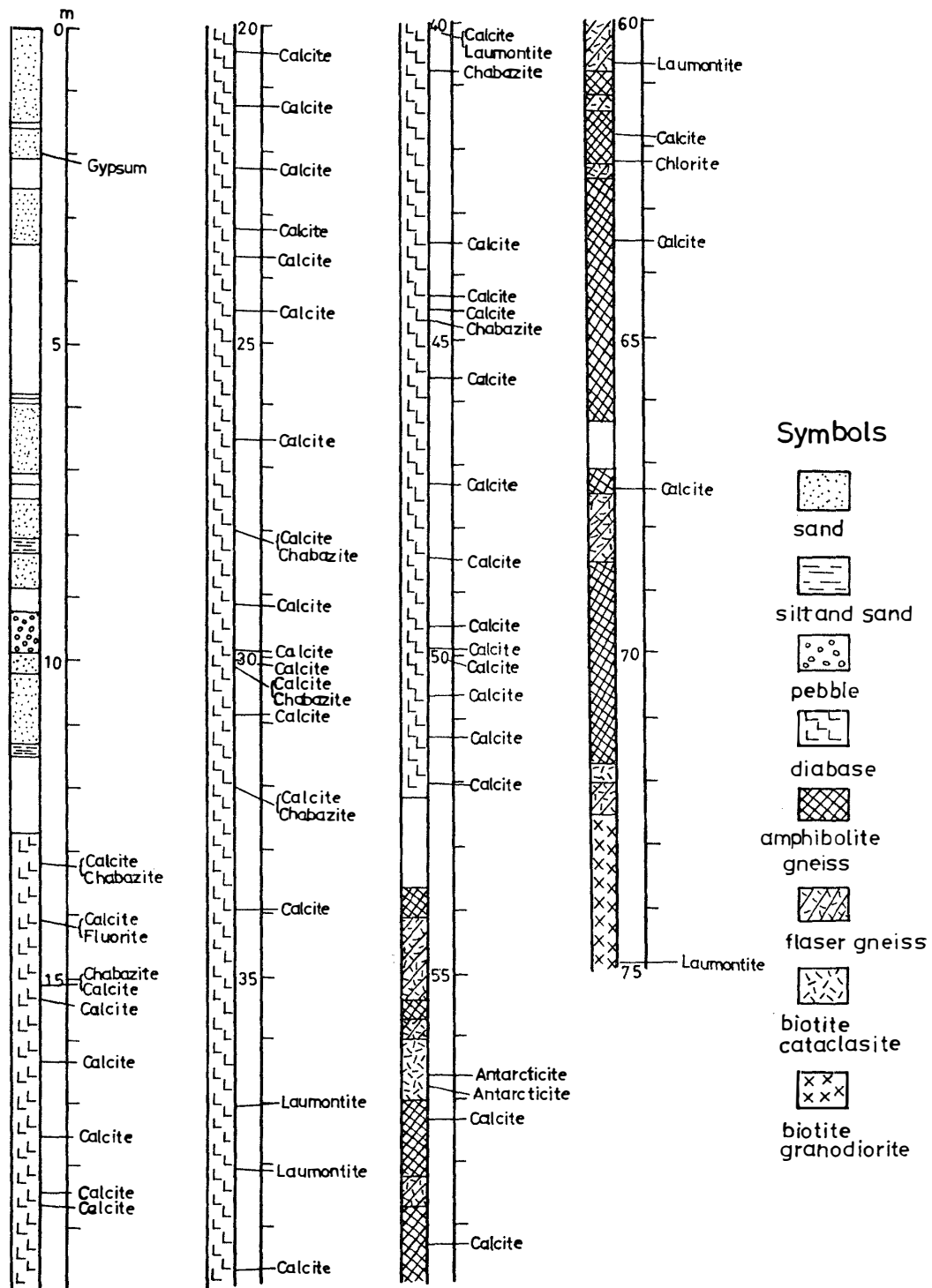
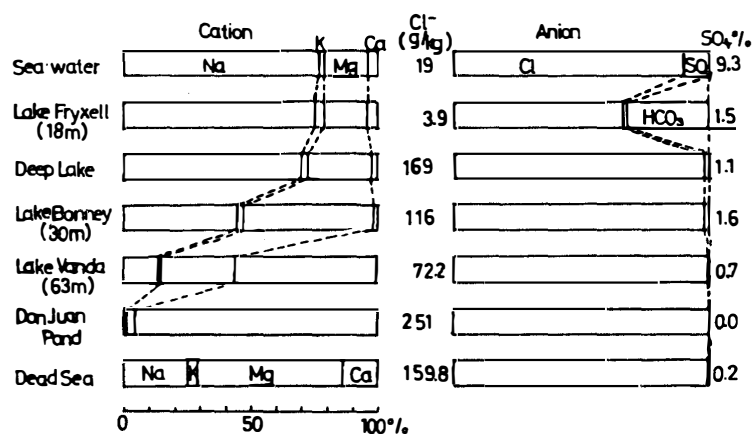


図 5 ドンファン池のボーリングコア中に含まれている塩類析出物
 Fig. 5. Secondary minerals in cores from DVDP 14 (Don Juan Pond).

図 6 湖水の化学成分 (YAMAGATA *et al.*, 1967 による)Fig. 6. Chemical composition in saline waters. (after YAMAGATA *et al.*, 1967)

ほとんどで、他に SO_4^{2-} やフリクセル湖では HCO_3^- が認められている。次にこれらの湖水の化学成分と今回得られた塩湖周辺に産出している各種の塩類鉱物の分布(図 3)を比較してみると、周辺の塩類鉱物を多く作っている元素が、必ずしも湖水の化学成分の多くの割合を占めているとは限らない。むしろ逆の関係のみられる元素がある。たとえば硫酸イオンについて、テイラー谷のボニー湖やフリクセル湖に比べると、ライト谷のバンダ湖やドンファン池には少ないにもかかわらず、塩類析出物ではライト谷に多量の硫酸塩(石膏)が晶出している。したがって、塩湖の化学成分は周辺の塩類析出物の溶脱によってもたらされたのではなく、塩湖の化学成分と塩類析出物とは相おぎなう関係にある。このことから、もともと同じ成分をもったもの(海水)が、それぞれの谷で異なった蒸発、析出、溶脱の過程を経て、現在みられるような塩類の分布と湖水の化学成分になったと推察される。硫黄の同位体の研究によると、ドライバレーの硫黄の起源は海水または風送塩によることが明らかになっているので、同じ成分をもったものとしては海水が妥当であろう。次に海水を蒸発させていくと、 CaCO_3 - CaSO_4 - NaCl -(MgSO_4)の順に晶出し、最後に MgCl_2 , MgSO_4 に富んだ液が残る。一方、低温で海水から氷をとり除いていくと、(CaCO_3)- $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -カリウム・マグネシウムの塩の順に沈澱し、塩化カルシウムに富んだ液が残る (THOMPSON and NELSON, 1956)。ドライバレーでは当然両方の反応が起こっていると考えられ、夏期には主として前者が、冬期には後者の反応が優先していると思われる。図 3C で芒硝石 (Na_2SO_4) が一様な分布を示すことから、冬期の条件は両谷とも比較的類似しているのかもしれない。夏期ではテイラー谷とライト谷の地理的および気象的条件が異なっている。テイラー谷では少量の降雪がみられ、また氷河が谷の中央まで張り出しているの、谷の両側から、降雪と

融水による水と大気からの CO_2 の供給があるのに対して、ライト谷では、常に乾燥し、夏の二カ月間には氷河の融水は一つの川(オニックス川)に集められて、バンダ湖に注いでいる。現況のような塩類析出物の分布と湖水の化学成分の相違は、両谷の地理的・気象的条件に基づく水と CO_2 の供給量と海水の濃集機構の違いによるものであろう。

次に、サーモナトライト、重炭酸ソーダ石の分布が、テイラー谷のニューハーバー湾近くに限られていることは、塩類析出物の分布における特徴の一つであった。

硫曹鉍 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)、あるいは硫曹鉍に飽和した溶液は、一定の条件のもとでは、Ca の炭酸塩とゆっくり反応して、硫酸塩と Na の炭酸塩を生じることが、THOMPSON and NELSON (1956) によって実験的に確かめられている。したがって、テイラー谷に産出する Na の炭酸塩も、最初方解石が沈澱して、その後 Ca が Na に置換されて、サーモナトライトや重炭酸ソーダ石になったのではないかと思われる。これはフリクセル湖の化学成分が他の湖水の化学成分に比べて、 Na^+ 、 HCO_3^- に富んでいることとも一致している (図 6)。

これまでに塩類析出物のほとんどは海あるいは風送塩によるものと考えたが、一部には明らかに熱水作用によってできたとみられる塩類析出物もある。ドンファン池は幅数百 m、深さ数十 cm の小さな池で、南極石などの多量の塩類析出物の産出と池の水の Ca および Cl 成分が高いことで知られている。そしてコアの試料から同定された塩類析出物のなかには、濁沸石、菱沸石、螢石、緑泥石などの熱水作用によってできたとと思われる鉱物が含まれている。また、ロス島のボーリングコアにも菱沸石など類似した塩類析出物がみられること (BROWNE, 1973) やドライバレー地域にはいくつかの噴石丘がみられることなどを考えあわせると、ドンファン池では、かつて熱水活動があったことは間違いない。中井他 (1975)、綿抜他 (1975) によって、バンダ湖やビイダ湖のコア中にもフィルム状の塩類析出物 (主として方解石と石膏) が報告されており、これらの池もドンファン池と同様、かつて多少の熱水活動があったものと考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、野外調査および室内研究を許可された京都大学工学部資源工学科港種雄教授に感謝する。さらに現地で多大のご指導とご協力をいただいた倉沢一博士、神沼克伊博士をはじめ、DVDP 1974-75 隊の方々に感謝の意を表します。また名古屋大学理学部地球科学教室中井信之助教授には原稿をみていただき、種々のご教示をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げる。

文 献

- BROWNE, P. R. L. (1973): Secondary minerals in cores from DVDP 1 and 2. DVDP Bull., **2**, 83-89.
- 森川日出貴・小坂丈予 (1975): バンダ湖周辺の二次生成鉱物の分布. 地球化学, **9**, 51-60.
- 中井信之・和田秀樹・清棲保弘・滝本幹夫 (1975): 南極ドライバレー, バンダ湖の塩類と水の同位体による研究. 地球化学, **9**, 37-50.
- THOMPSON, T. G. and NELSON, K. H. (1956): Concentration of brines and deposition of salts from sea water under frigid condition. Am. J. Sci., **254**, 227-238.
- 綿抜邦彦・森川日出貴 (1975): ドライバレー掘削プロジェクトにより得られた鉱物の地球化学的検討. 地球化学, **9**, 67-71.
- 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.