

ドライバレー地域の塩湖の栄養塩分布について

中谷 周*・鳥居鉄也**・山県 登***

Distribution of Nutrient Matters in Saline Lakes in the Dry Valleys, South Victoria Land, Antarctica

Shyu NAKAYA*, Tetsuya TORII** and Noboru YAMAGATA***

Abstract: The distribution of nutrient matters in the saline lakes in the Dry Valleys was studied on the spot in the summers 1971–1972 and 1972–1973. The presence of a large amount of nitrogen compounds in the saline lakes was pointed out and their source was discussed together with the distribution pattern of the respective nitrogen compound in the lake water. Most of the nutrient matters were probably supplied by the melt water from the adjacent glaciers and by the decomposed organic matters in the bottom sediments of each lake.

要旨: 1971–1972, 1972–1973 年の夏季 2 シーズンにドライバレー地域の代表的な塩湖の栄養塩類について、その分布状況を調査した。この地域の塩湖は、各湖ごとに全く異なる水質を示すが、栄養塩類もそれぞれ異なる分布を示した。とくに、これら塩湖の窒素化合物が高濃度であることが注目されたが、その起因として流入水、湖底堆積物からの供給によるものと考えられる。

溶存酸素や栄養塩類の濃度分布から、これらの塩湖ではバクテリア等生物活動が活発に行われていると考えられる結果を得た。

1. は じ め に

雪と氷の南極大陸にも、南極オアシスと呼ばれる地域には無氷雪の露岩地域があり、そこに多くの湖沼群が存在している。南極オアシスは南極全体で 20 数カ所が知られているが (SIMONOV, 1971), 南部ビクトリアランドのマクマード・オアシスは南極最大 (約 4,000 km²) の面積を持ち、通称ドライバレー地域 (約 2,500 km²) はほぼその中央に位置している。

ドライバレー地域には、3つの大きな乾いた谷、ビクトリア、ライト、テイラーがあり、各谷には種々の湖沼が存在しているが、著者らはライト谷のバンダ湖、テイラー谷のボニー

* 北海道大学水産学部. Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Minato-machi 3-1-1, Hakodate 041.

** 千葉工業大学. Chiba Institute of Technology, Tsudanuma 2-17-1, Narashino 275.

*** 国立公衆衛生院. The Institute of Public Health, Shirokanedai 4-6-1, Minato-ku, Tokyo 108.

湖，フリクセル湖の調査，研究を 1963 年の鳥居らによる調査以来続けている。

南極の湖沼の栄養塩類についての調査がきわめて少ないので，1971-1972 年，1972-1973 年の夏季シーズンに，主として塩湖の栄養塩類分布について調査し，興味ある知見を得た。この結果についての考察を報告する。

2. ドライバレー地域の概要と塩湖の化学的特徴

南極オアシスは局所的な特殊気象に支配され，周辺氷河地域や内陸氷原とは全く景観を異にしており，無氷雪の露岩地帯となっている。ビクトリアランドのドライバレー地域も高度の乾燥地域で，氷食谷の凹地には多くの湖沼が存在している。

代表的な 3 つの塩湖，バンダ，ボニー，フリクセルの各湖は，いずれも底層水が高塩分の部分循環湖で，湖面は年間を通して約 3 m の湖水でおおわれている。そして夏季の約 60 日間，周辺氷河からの融氷水の供給をうけるが，無排出口湖にもかかわらず湖面がほぼ同じ水位を保っている。これは，湖面からの蒸発や昇華が活発に行われていることを示すものである。

湖水の塩分濃度は，いずれも深度とともに増加するが，底層水の塩分濃度は塩化物イオンを指標として海水と比較すると，バンダ湖で約 4 倍，ボニー湖では東湖で 8.5 倍，西湖で 4 倍，フリクセル湖で 1/4 倍となっている。その水質は湖によって異なるが，ナトリウムとカリウム，カルシウム，マグネシウムの当量百分率で表し，南極のおもな塩湖と比較して図 1

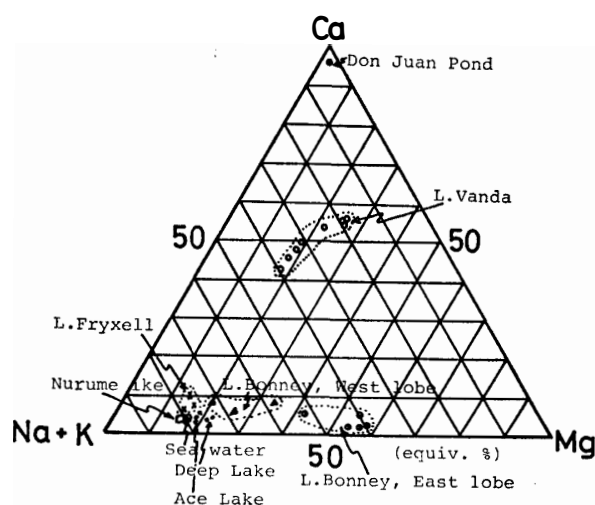


図 1 南極塩湖の Ca, Mg, Na+K の関係

Fig. 1. Relations of Ca, Mg and Na+K in the Antarctic saline lakes.

に示す。フリクセル湖は大陸沿岸近くに存在するディングル湖，ディープ湖，エース湖（ベストフォールド・オアシス），ぬるめ池（昭和オアシス）などの塩湖と同じく海水組成に近い。しかし，ボニー湖はマグネシウム，バンダ湖はカルシウムに富んでおり，湖水の起源を海水とし，単純に海水の濃縮だけで説明することが困難な塩湖である。

これら塩湖の成因，塩の起源に関する研究の報告は種々あるが，湖水の安定同位体比による研究（RAGOTZKIE *et al.*, 1965；CRAIG, 1966；AMBE, 1974；中井他, 1975；松葉谷他, 1974）から，現在の湖水は，陸水，すなわち周辺氷河の融水によって涵養されていることが明らかにされている。

3. 栄養塩類の分析法

ドライバレー地域の塩湖は，きわめて高い塩分濃度を示し，また底層水には硫化水素が存在することから，栄養塩類の分析法には基本的には STRICKLAND *et al.* (1968) に基づき，著者らが検討，開発した表 1 の方法を用いた。結果は現地で試料採取後，数時間内に測定したものである。分析結果の詳細については既に報告があるので省略する（TORII *et al.*, 1975；鳥居, 1975）。

表 1 分 析 法
Table 1. Analytical methods.

SiO ₂ -Si	Molybdenum yellow method
PO ₄ -P	Molybdenum blue method
NH ₄ -N	Modified Richards and Kletsch method (1964)
NO ₃ -N	Modified Morris and Riley method (1963)
NO ₂ -N	Nishimura's method (NISHIMURA <i>et al.</i> , 1969)

4. 塩湖の栄養分布と考察

4.1. バンダ湖（ライト谷）

水温は表面氷下（-0.1°C）から混合層である 40 m 層（7.7°C）まではいくつかの定温層を含み上昇し，40 m 以深では深度とともに急激に上昇し，底層では 25°C を示す。この高温の熱源は太陽熱によるもので（たとえば，YUSA, 1975），湖底からの熱の供給，生物活動などによるものではない。

溶存酸素の鉛直分布は，湖水の下から 55 m 深までは過飽和状態にある。しかし，55 m 以

深では急激に減少し、59 m 深では無酸素となり底層まで無酸素層となる。59 m 深より硫化水素が検出されるが、湖底近くの 65 m 付近では 40 mg/l を示している。この硫化水素の存在は、硫酸還元バクテリアの硫酸還元によるものと考えられる (BARGHOOM *et al.*, 1961)。

リン酸態リンはオニックス川が流入する湖東方の流入口付近と湖水下で観測されるが、下層では図 2 に示すようにほとんど存在しない。これとは対照的に、図 2 に示すケイ酸態ケイ素は深度とともに増加し、とくに 40 m 以深では急激に増加する。このようなケイ酸態ケイ素の鉛直分布は、主要成分の鉛直分布ときわめてよく類似しており、主要化学成分と同様に湖底堆積物からの再溶出によるものと考えられる。

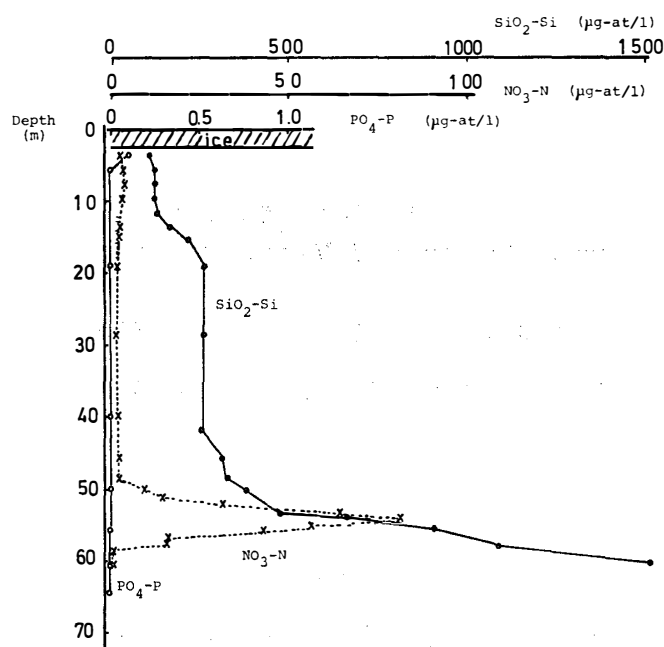


図 2 バンダ湖における栄養塩類の鉛直分布

Fig. 2. Vertical distribution of nutrient matters in Lake Vanda.

窒素の三態、すなわち亜硝酸、硝酸、アンモニア態の各窒素の鉛直分布を図 2 に示すが、硝酸態窒素の鉛直濃度分布でみると、上層では 2~3 µg-at/l の低濃度であるが、50 m 深より増加し、54 m 層に極大が現れ、81 µg-at/l の高濃度となる。しかし、58 m 以深では存在しない。これは亜硝酸態窒素でも同様であって、54 m 以深で減少している。

図 3 に無機態窒素化合物の鉛直分布を示す。同時にここには全無機性窒素量と、各態窒素の全無機性窒素に対する存在比を百分率で表したものを示す。全無機性窒素は 54 m 層（亜硝酸、硝酸態窒素の極大層）に極大を有し、それ以深で減少している。窒素の三態の存在比をみると、底層水ではアンモニア態窒素のみが存在する。これは、58 m 以深では溶存酸素

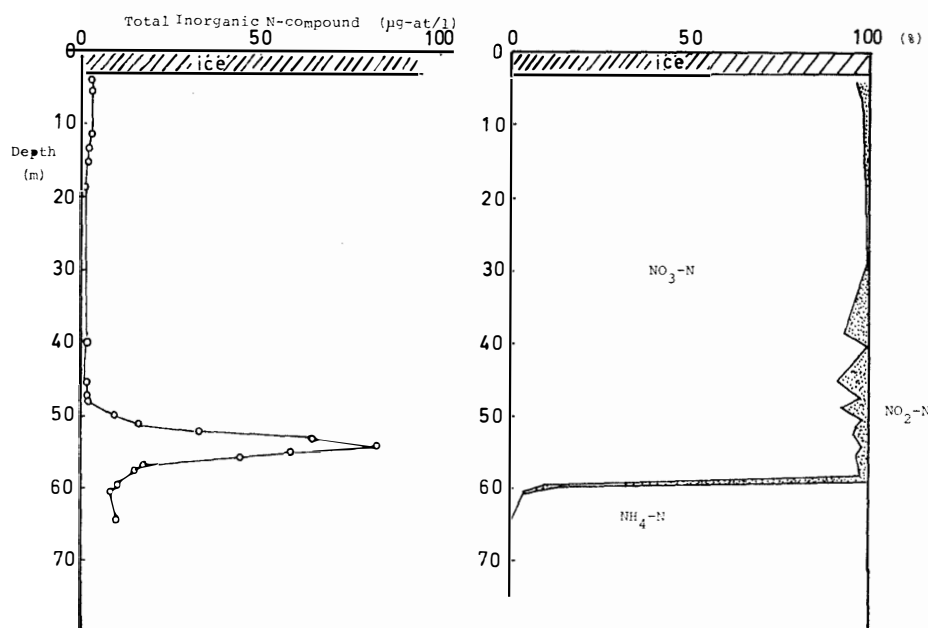


図 3 バンダ湖の N-化合物の鉛直分布

Fig. 3. Vertical distribution of N-compounds in Lake Vanda.

量が減少し、60 m 以深では無酸素状態となるために、硝酸態窒素が還元されていること、また、バクテリアの存在による脱窒現象がおこり、底層ではアンモニア態窒素が生成存在するためと考えられる。

4.2. ボニー湖（テイラー谷）

ボニー湖は東湖と西湖が狭い水路で結ばれている。主要化学成分からみると、この東西 2 つの湖は、全く異なる水質の湖が結ばれ、1 つの湖を形成していると考えてよい。

水温分布をみると、東湖では水深 13~16 m 層に水温極大層 (6°C) を有し、一方、テイラー氷河の末端に接する西湖では、水深 6~7 m 層に極大層 (2.2°C) を持っている。2 つの湖ともそれ以深では水温は低下し、底層では東湖で -2.6°C 、西湖で -4.6°C の低温となっている。

溶存酸素は東湖では 13 m 層まで、西湖では 8 m 層まで過飽和状態にある。両湖ともそれ以深では急激に減少し、西湖では 15 m 以深で無酸素状態となっている。しかし、バンダ湖で検出された硫化水素は検出されない。一方、東湖では西湖と異なり、底層でも 1~2 ml/l の溶存酸素が存在するのが注目される。

栄養塩類の鉛直分布も東湖、西湖では全く異なっている。リン酸態リンの鉛直分布をみると、図 4 に示すように、東湖では、バンダ湖同様に全層検出されない。しかし、西湖では

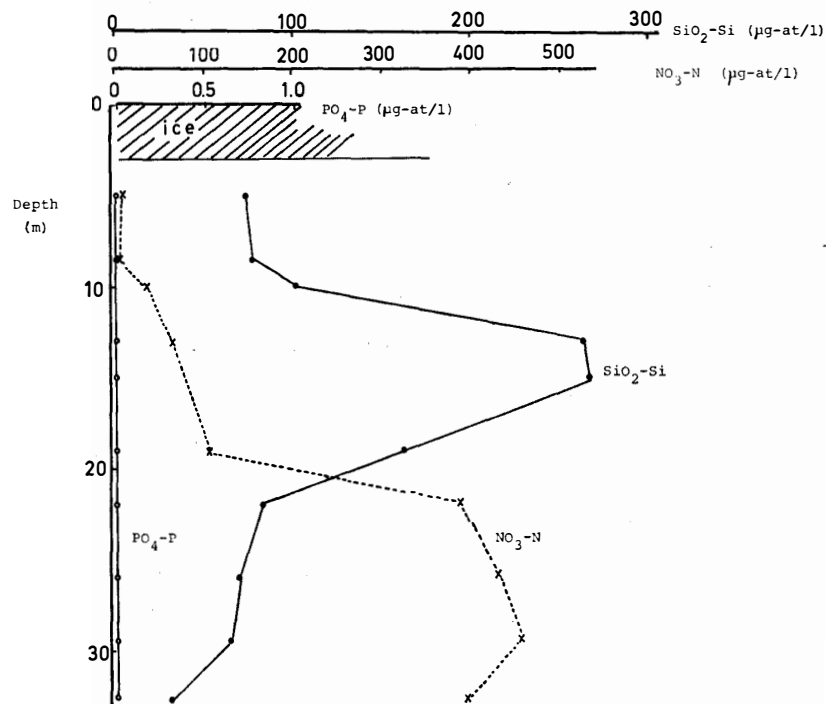


図 4 ポニー湖, 東湖の栄養塩類の鉛直分布

Fig. 4. Vertical distribution of nutrient matters in Lake Bonney, east lobe.

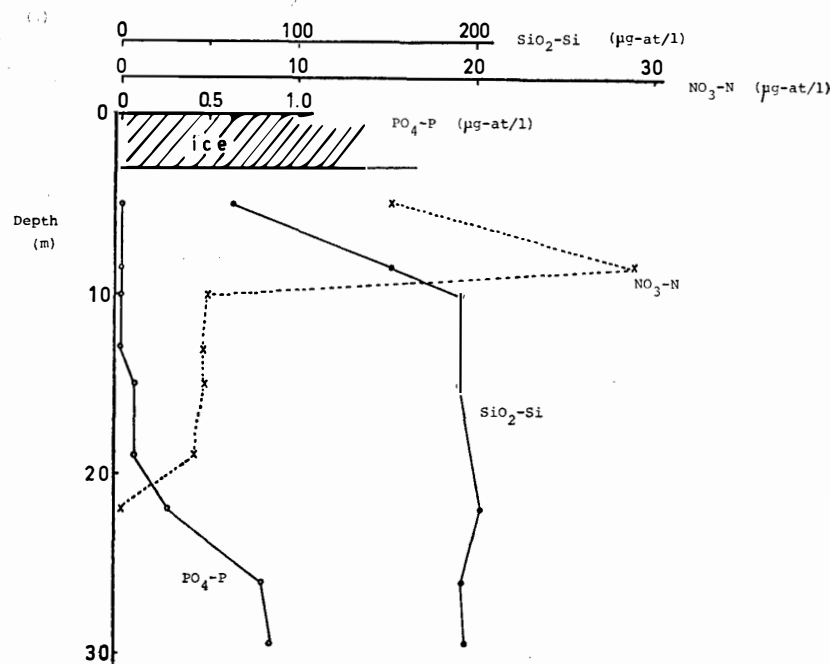


図 5 ポニー湖, 西湖の栄養塩類の鉛直分布

Fig. 5. Vertical distribution of nutrient matters in Lake Bonney, west lobe.

20 m 以深から多くなり、底層では図 5 に示すように、 $0.8 \mu\text{g-at/l}$ の濃度となっている。

図 4, 5 にみられるように、ケイ酸態ケイ素は東湖、西湖ともにパンダ湖とは異なる鉛直分布を示している。すなわち、東湖では 15 m 層付近（水温極大層）に極大層をもち、それ以深では減少している。しかし、西湖では 10 m 以深から $200 \mu\text{g-at/l}$ 前後のほぼ一定濃度を示している。

窒素化合物の鉛直分布をみると、硝酸態窒素の分布は図 4, 5 に示す通り、東湖では 20 m 以深で急激に増加し、30 m で $400 \mu\text{g-at/l}$ 前後の高濃度である。しかし、西湖では 8 m 付近に極大層を持ち、それ以深から減少し、26 m 以深では存在しない。このことは溶存酸素、全無機性窒素および各態窒素の全無機性窒素に対する存在比から考え、生物活動の存在を示すものと考えることができる。すなわち、図 6 に示すように、東湖では硝酸態窒素が全層で主要部分を占めるが、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素も存在する。これからも生物活動の存在を考えることができるが、パンダ湖のように活発ではなく、脱窒が起こりうるほどではないことを示している。しかし、生物活動が進めば、パンダ湖、ボニー湖西湖（以下に示す）のような分布になると考えられる。西湖についてみると、溶存酸素および図 7 に示す硝酸態窒素の分布、底層でのアンモニア態窒素の存在から、水温が 0°C 以下であるので、脱窒が

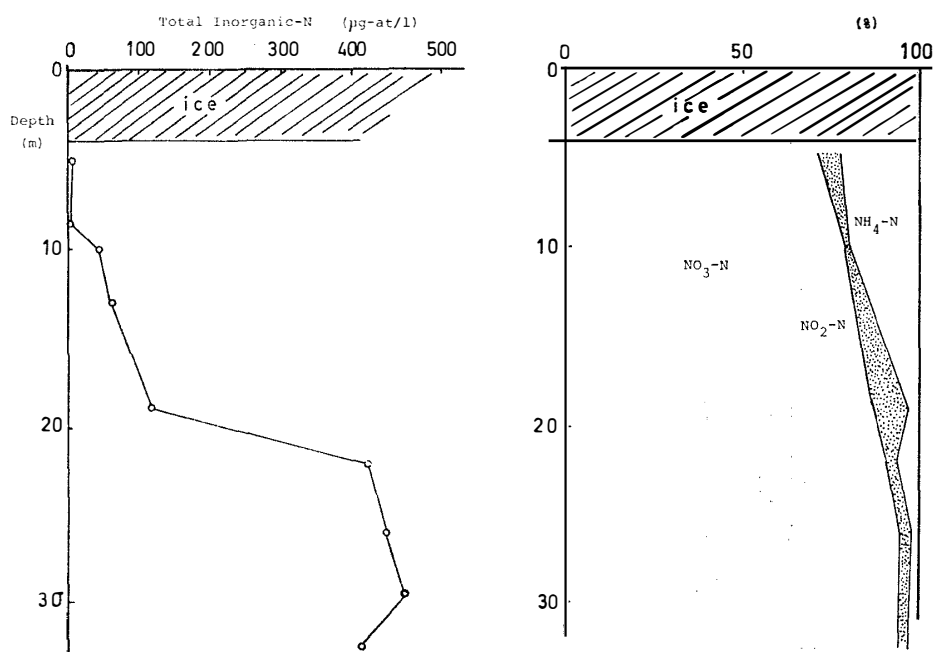


図 6 ボニー湖、東湖の N-化合物の鉛直分布

Fig. 6. Vertical distribution of N-compounds in Lake Bonney, east lobe.

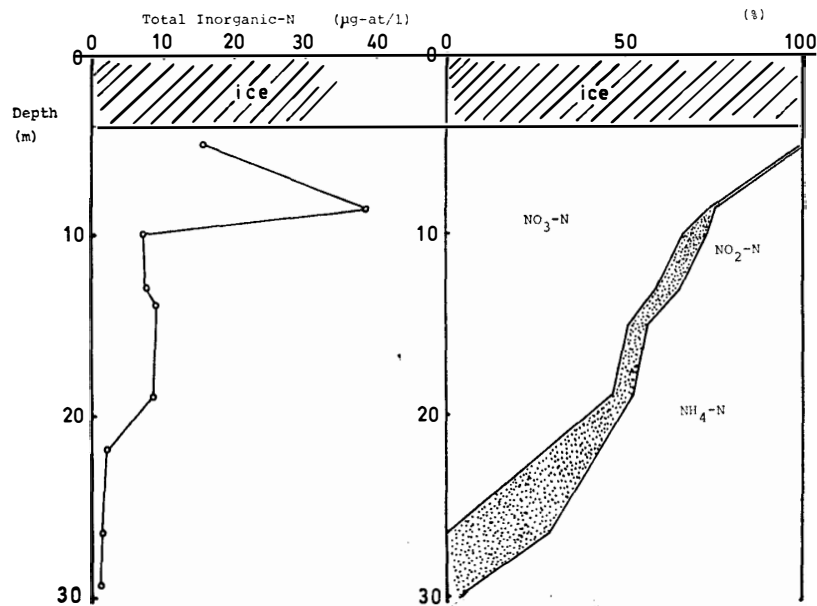


図 7 ポニー湖、西湖の N-化合物の鉛直分布

Fig. 7. Vertical distribution of N-compounds in Lake Bonney, west lobe.

行われているかどうか明らかにされていないが、脱窒のおこりうる環境にあるともいえる。

4.3. フリクセル湖（テイラー谷）

湖水の化学組成は前述のように海水組成に近いが、塩分濃度は海水よりも低濃度である。

水温分布は湖水下では 0.2°C で、8 m 深に極大層 (1.9°C) を示し、水深とともに徐々に低くなり、底層では 1.6°C である。

溶存酸素の分布をみると、10 m 以深で無酸素状態となり、バンダ湖同様 8 m 深から硫化水素が検出され、底層 16 m では 22.6 mg/l の濃度である。

リン酸態リンは図 8 に示すように、底層水に高い濃度を示し、16 m 層では $50 \text{ } \mu\text{g-at/l}$ である。この高濃度のリン酸態リンは、フリクセル湖が海岸近くにあつて、鳥類の飛来することから、これら生物の影響によるものと考えられる。また、その鉛直分布の傾向からケイ酸態ケイ素と同様湖底堆積物からの再溶出が考えられる。

図 8 に示すように、ケイ酸態ケイ素はバンダ湖同様深度とともに増加し、底層で高い濃度を示している。

窒素化合物についてみると、図 8 に示すように、硝酸態窒素が全層にわたり存在していない。図 9 に示す窒素の三態および全無機性窒素に対する存在比からみると、活発な生物活動が行われているものと考えられる。

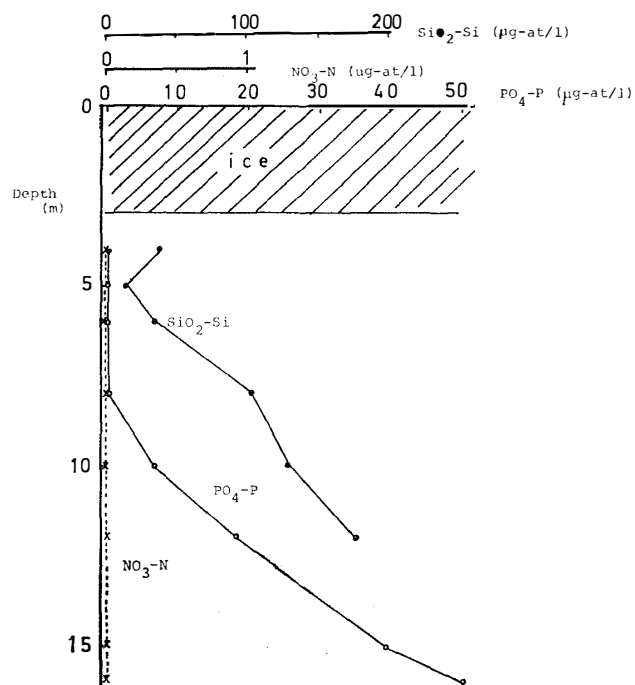


図 8 フリクセル湖の栄養塩類の鉛直分布

Fig. 8. Vertical distribution of nutrient matters in Lake Fryxell.

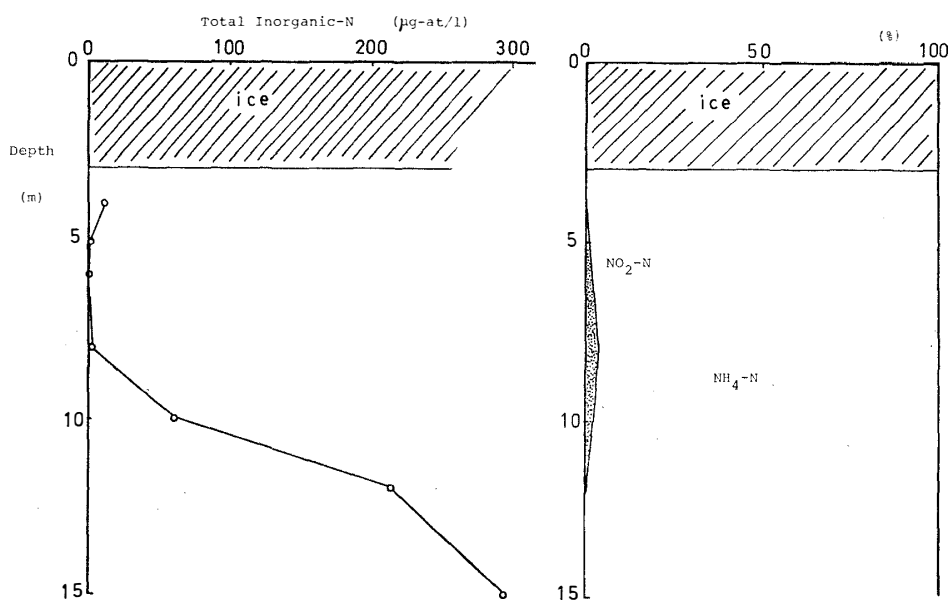


図 9 フリクセル湖の N-化合物の鉛直分布

Fig. 9. Vertical distribution of N-compounds in Lake Fryxell.

5. 窒素化合物の起因

ドライバレー地域の塩湖では、高濃度の窒素化合物の存在することが注目される。表2に示すように、昭和オアシス、ベストフォールド・オアシスなど沿岸オアシスの湖沼と比較すると、ドライバレー地域の塩湖はきわめて高濃度であることを示している。日本各地等の湖沼の窒素化合物は、大気からの降水等による供給によるものであるが、ドライバレー地域は非常な乾燥地域であり、降水量も少ない。したがって、このような高濃度の窒素化合物の起因を考えると、表3に示すように湖水への流入水や湖底堆積物からの溶出によるものと考えられる。

JENSEN (1916), CLARIDGE and CAMPBELL (1968) らは、マクマード・オアシスの土壤中に相当量の窒素化合物の存在することを報告しており、JOHANNESSON *et al.* (1962), MORIKAWA *et al.* (1975), NISHIYAMA *et al.* (1975) らも塩湖周辺の塩類析出物、あるいは土壤中に硝酸塩化合物が存在することを報告している。表2に示すように、バンダ湖で行われた DVDP 掘削で得られた二層の地下水中でも、高濃度の窒素化合物の存在が確かめられている。以上のことを考えると、ドライバレー地域の塩湖の高濃度の窒素化合物は、湖底堆積物からの再溶出、流入水による供給によるものであろう。

表2 湖沼の窒素化合物濃度

Table 2. Concentration of nitrogen compounds in some lakes.

	Cl (g/kg)	NO ₂ -N	NO ₃ -N (μg-at/l)	NH ₄ -N
In Japan				
Lake Biwa	0.0053-0.0064*	0.0-0.6	7.6-8.5	4.2-6.4
In Antarctica				
Langhovde				
Kitamine ike (temporal)	100.4	0.06	0.49	1.0
Naka ike (temporal)	3.492	0.06	0.10	0.15
Vestfold Hills				
Deep Lake	160*	0.03	5.40	—
Dry Valley				
Lake Vanda				
Bottom water (64.6 m)	74.28	0	0	10.1
Ground water				
No. 1 (72.2 m)	94.24	8.2	0	47
No. 2 (75.7 m)	108.7	7.8	0	19.6

* in g/l

表 3 ドライバレー地域で採取した流入水の栄養塩類濃度
Table 3. Concentration of nutrient matters in inflow waters collected from the Dry Valley area.

Location	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	SiO ₂ -Si	PO ₄ -P
	(μg-at/l)				
Lake Vanda					
Melt water from Lake Wright					
Lower Glacier (26 Dec. 1972)	nil	1.79	4.88	3.0	0.43
Lake Wright (26 Dec. 1972)	0.04	1.59	3.27	3.0	0.37
Onyx River from Lake Wright (26 Dec. 1972)	0.00	0.36	0.00	12.0	0.04
Onyx River weir (17 Jan. 1973)	0.38	4.50	0.00	97.0	0.25
Lake Bonney					
Inflow from west (5 Jan. 1973)	0.74	15.5	nil	91.0	0.81
Inflow from east (9 Jan. 1973)	0.33	21.8	nil	95.5	0.58

6. ま と め

ドライバレー地域の塩湖の栄養塩類や溶存酸素量などの分布から、これらの塩湖には生物活動（硫酸還元菌や脱窒菌）があるものと考えられる。また、栄養塩類の中でも窒素化合物が、南極の他の地域の湖沼や日本各地の湖沼に比較してきわめて高濃度であり、この起因としては、周辺氷河融水、湖底堆積物からの溶出供給によるものが考えられる。

これら栄養塩類の分布を調べてみると、ドライバレー地域の塩湖について、低温環境下の高塩水の微生物学的研究をあわせて行う必要があると考えられる。終りに、ドライバレー地域の調査に参加ご協力を賜った諸氏に心から謝意を表し、厚くお礼申し上げます。

文 献

- AMBE, M. (1974): Deuterium content of water substances in Antarctica. Part II. Geochemistry of deuterium of lake waters in Victoria Land. Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.), **48**, 100-109.
- BARGHOOM, E. S. and NICHOLS, R. L. (1961): Sulfate-reducing bacteria and pyritic sediments in Antarctica. Science, **134** (3437), 190.
- CLARIDGE, G. G. C. and CAMPBELL, I. B. (1968): Origin of nitrate deposits. Nature, **219** (5217), 428-430.
- CRAIG, H. (1966): Origin of the saline lakes in Victoria Land, Antarctica. Trans. Am. Geophys. Union, **47** (1), 112-113.
- JENSEN, H. I. (1916): Report on Antarctic soils. Reports of scientific investigations of the British Antarctic Expedition, 1907-1909. Geology, **2** (9), 89-92.

- JOHANNESSON, J. K. and GIBSON, G. W. (1962): Nitrate and iodate in Antarctic salt deposits. *Nature*, **194** (4828), 567-568.
- 松葉谷 治・中谷 周・村山治太・鳥居鉄也・酒井 均 (1974): 南極の塩湖の水素と酸素の同位体比と主成分. 地球化学討論会講演要旨集, 於学習院大学, 1974年10月, 168.
- MORIKAWA, H., MINATO, I., OSSAKA, J. and HAYASHI, T. (1975): The distribution of secondary minerals and evaporites at Lake Vanda, Victoria Land, Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **4**, 45-59.
- MORRIS, A. W. and RILEY, J. P. (1963): Determination of nitrate in sea water. *Anal. Chem. Acta*, **29**, 272-279.
- 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—バンダ湖の塩類と水の起源と湖の歴史的変遷—. *地球化学*, **9**, 37-50.
- 西村雅吉・松永勝彦・金沢秀郎 (1969): Griss-Romijn 試薬による亜硝酸比色定量についての知見とイオウ化合物およびヨウ素イオンによる妨害の除去. *分析化学*, **18**, 1372-1376.
- NISHIYAMA, T. and KURASAWA, H. (1975): Distribution of secondary minerals from Taylor Valley. *DVDP Bull.*, **5**, 120-133.
- RAGOTZKIE, R. A. and FRIEDMAN, I. (1965): Low deuterium content of Lake Vanda, Antarctica. *Science*, **148** (3674), 1226-1227.
- RICHARDS, F. A. and KLETSCH, R. A. (1964): The spectrophotometric determination of ammonia and rabile amino compounds in fresh and sea water by oxidation to nitrite. *Recent Researches in the Fields of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry; Ken Sugawara Festival Volume*, ed. by Y. MIYAKE and T. KOYAMA, Tokyo, Maruzen, 65-81.
- SIMONOV, I. M. (1971): Oazisy vostochnoy Antarktity (The oases of eastern Antarctica). Leningrad, Gidrometeorologicheskoe, 176 p.
- STRICKLAND, J. D. H. and PARSONS, T. R. (1968): A Practical Handbook of Sea Water Analysis. Ottawa, Fisheries Research Board of Canada, 45-87.
- TORII, T., YAMAGATA, N., NAKAYA, S., MURATA, S., HASHIMOTO, T., MATSUBAYA, O. and SAKAI, H. (1975): Geochemical aspects of the McMurdo saline lakes with special emphasis on the distribution of nutrient matters. *Mem. Natl Inst. Polar. Res., Spec. Issue*, **4**, 5-29.
- 鳥居鉄也 (1975): マクマード・オアシス塩湖の水質—とくに栄養塩類分布について—. *地球化学*, **9**, 22-36.
- YUSA, Y. (1975): On the water temperature in Lake Vanda, Victoria Land, Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **4**, 75-89.