

南極塩湖の化学的特徴

鳥居鉄也*・山県 登**・中谷 周***・村田貞雄*

Chemical Characteristics of Antarctic Saline Lakes

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

Abstract: Chemical characteristics of main Antarctic saline lakes found in the oases of McMurdo, Vestfold and Syowa are reviewed.

Lakes are primarily classified into the fresh and saline ones and then the latter into coastal lakes and those located in the glacial trough such as the Dry Valleys, Victoria Land. The coastal saline lakes are characterized by that the elevation of lake surface is below sea level and the chemical composition, such as M/C₁ ratio, isotopic ratio of oxygen and hydrogen, and also the nutrient elements resemble those of sea water, while the saline lakes in the Dry Valleys have a complex origin.

From the geochemical point of view, it is suggested that the formation of the coastal lakes is much younger than that of the lakes in the Dry Valleys.

要旨：南極大陸の露岩地域には多くの湖沼が存在するが、その塩分濃度あるいは化学組成にはさまざまな特徴がみられる。この報告は、昭和、マクマード、ベストフォールドの各オアシスの湖沼調査から、とくに塩湖の化学的特徴を中心として述べたものである。

南極の塩湖は、沿岸地域と山岳地域のものとに大別されるが、前者は一般に湖面高度が海面下にあって、地形上からも、また水質や湖岸堆積物などの化学的特徴からみても海跡湖とみられるものが多い。一方、山岳地域のものは、旧潮岸線も存在し湖水面が過去に大きく変動し、湖水がくりかえし濃縮されたことを示唆するが、水質が海水と異なって単純に塩分の起因を説明しえない。しかし、最近実施されたDVDP調査の結果から、これら山岳地域の塩湖も塩類の大部分は海水に由来し、その後変質したと考えられるに至った。そして水質の考察から、沿岸地域のものより一般に古い歴史をもつものと推定される。

* 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.

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

1. はじめに

南極観測の再開以降、地球化学部門は研究テーマとして、南極水圏の物質循環に関する研究を重点的にとりあげたので、これに関連して湖沼調査が現在に至るまで活発に行なわれてきた。

とくに、第8次観測隊がスカルブスネスで2つの塩湖（舟底池、すりばち池）の存在を発見したことから、プリンスオラフ海岸一帯の塩湖調査が行われ、ラングホブデにも多くの小塩湖が点在することが確かめられた。一方、南部ビクトリアランドのドライバレー地域の塩湖についても、1963年以来著者ら (YAMAGATA *et al.*, 1967; 綿抜, 1975) によって総合調査が続けられており、南極塩湖について多くの知見が得られるに至った。これらの調査結果に外国隊の報告をあわせて、低温地域に存在する塩湖の概括を述べることにする。

2. 南極の主な湖沼とその分類

南極大陸の一部の沿岸露岩地域やオアシスと呼ばれる無氷雪地域には、氷河作用、あるいは氷河後退に伴う地殻運動などによってできた数多くの湖沼が存在する。これらの湖沼については IGY 以来、主として日本、アメリカ、ソ連、オーストラリア、ニュージーランドの各隊によって湖沼学的調査が進められている。表1はすでに調査された南極大陸の主な湖沼を示す。

南極湖沼の大部分は、大陸氷河や降雪などの融氷水によって涵養されており、その水質は一般に淡水に近い。しかし、1947年2月、アメリカ隊のハイジャンプ作戦が実施されたとき、バンガー・オアシスにエジストカカポンなどの塩湖が発見されて以来、ベストフォールド、マクマード、シルマッヘル、昭和の各オアシスにも化学組成を異にするさまざまなタイプの塩湖が発見され、塩湖の成因についての調査は古気候学と関連して多くの興味深い研究課題を提供するに至った。

SIMONOV (1971) は、主としてバンガー・オアシスやシルマッヘル・オアシスの湖沼調査の経験から、南極湖沼の分類を行っているが、これらは淡水湖に主眼がおかれていたので、筆者らが行った塩湖調査の結果を加えて表2に示す。これによると、湖盆の成因については氷食作用によるものと潟成型に大別され、潟成型はさらに海跡湖とエピシェルフ湖に分けられる。エピシェルフ湖とは、棚氷縁辺に沿ってみられ、図1に示すように、湖の底部は棚氷の下で海とつながっている。しかし、氷点下の海水 ($-1.7 \sim -1.9^{\circ}\text{C}$) および棚氷の底部と

表1 主な南極湖沼
Table 1. Outline of main Antarctic lakes.

Oasis	Name	Length (m)	Max. breadth (m)	Depth (m)	Area (1,000 m ²)
McMurdo	Lake Vida	3,500	1,000	11.5	5,400
	Lake Vanda	5,000	1,400	68.5	
	Don Juan Pond	700	300	0.1	
	Lake Bonney	7,400	840	32.7	
	Lake Fryxell	5,000	2,000	18	
	Lake Miers	1,500	700	20.2	
Bunger	Figurnoe	25,000	1,200	137	16,000
	Polianskogo	2,300	700		1,600
	Edisto Kakapon			103	447,000
Vestfold	Club Lake	3,240	800	193	1,070
	Deep Lake	1,290	960	36	720
	Lake Stinear	3,390	440	15	950
	Lake Dingle	1,310	700	15	780
	Crooked Lake	8,700	2,500	143	9,000
Molodezhnaya	Glubokoe	850	460	35	280
	Lagernoe	380	220	10	53
Syowa	Lake Hunazoko	750	250	9.2	
	Lake Suribati	900	700	31.2	
	Lake Skallen Ôike	1,150	250	8.5	
	Lake Ô-ike	500	220	11.2	
Schirmacher	Ozhidaniia	1,950	900	105	1,359
	Lagernoe	530	180	39	90
	Glubokoe	700	350	32	130

接するため、その部分ではおそらく凍結して孔隙の多い半固体を示しているらしく、温度の低い海水と湖水の混合が行われていないようで、融氷水によって涵養されている湖水は、底層まで塩分濃度約 80 mg/l 程度の淡水性を示している。

湖沼の多くは露岩地帯の凹地や、モレーンに囲まれた所などに位置するが、その水收支をみると、排出口がみられず夏季における流入量（融氷雪水）と流出量（蒸発、昇華）とがある程度バランスを保っているか、あるいは流入量が流出量に比べてきわめて少ない環境にあるものは塩湖となっている。一方、流出水路をもち、夏季の流入量の供給が大きく、溢流によって湖水がある程度交代するものは、一般に淡水に近い水質を示している。

湖面は一般に冬季結氷するが、ディープ湖やドンファン池のような高塩分のものは、年間

表 2 南極湖沼の分類
Table 2. Classification of Antarctic lakes.

Type of lake	Typical lakes	Water	Outlet	Lake ice	Temperature stratification	Fresh or saline
1. Glacial lake	1. Lake Figurnoe (Bunger oasis)	Snow and ice melt	Open	Melt in summer	Normal	Fresh
	Don Juan Pond (McMurdo oasis)	Glacier melt	Closed	Unfrozen	None	Saline
	Lake Vanda (McMurdo oasis)	"	"	Perennially frozen	Inverse	Saline
	Lake Vida (McMurdo oasis)	"	"	Perennially frozen to the bottom		Fresh
2. Relict lake	Lake Hunazoko (Syowa oasis)	Snow and ice melt	"	Melt in summer	Normal	Saline
	Deep Lake (Vestfold oasis)	"	"	Unfrozen	Inverse	Saline
3. Epishelf lake	Lake Ozhidaniya (Schirmacher oasis)	Snow and ice melt plus sea water	Closed, connected underwater to sea	Perennially frozen	Inverse	Fresh

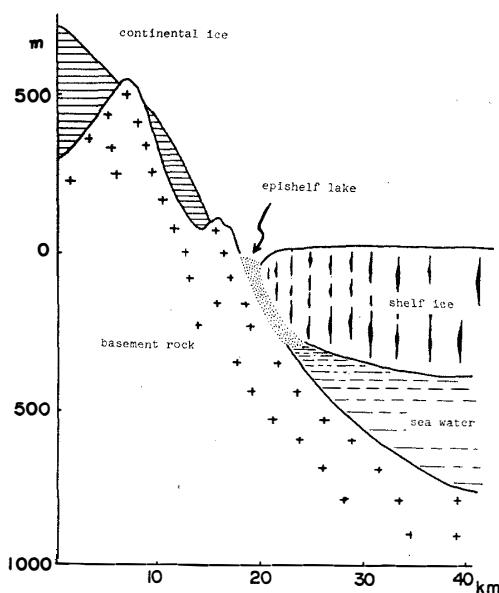


図 1 エピシェルフ湖の模式断面図 (SIMONOV による)
Fig. 1. Schematic profile of the epishelf lake (after I. M. SIMONOV).

を通じて結氷しない。また塩湖の中でも、ドライバレー地域のバンダ湖などのように年間約3mの湖水でおおわれているものもある。なお、バンダ湖やディープ湖のように、部分循環湖(meromictic lake)で底層に高塩分の水が存在する塩湖は、温度成層をみると下層ほど高温で、逆列成層となっている。

3. 塩湖の分布と特徴

3.1. 分 布

IGY以来、各國隊の地学調査が進むにつれて、南極大陸には多くの塩湖が存在することが明らかとなったが、その分布は現在のところ東南極大陸のオアシス地方に限られており、西南極大陸にはいまだ発見の報告がない。また、塩湖の大部分は大陸沿岸の露岩地帯に位置するが、南部ビクトリアランドのドライバレー地域のように、大陸沿岸から数10km離れた山岳・谷オアシスの氷食谷にも存在する。

ここで南極オアシスとは、南極大陸の無氷雪地域の中でも独立した景観をもつもので、数100km²以上の露岩面積をもち、周辺の大陸氷の気候とまったく異なった特異な局所的気候に支配されている所を呼ぶこととする。SIMONOV(1971)は、南極オアシスを分類し、大陸沿岸地域にみられるものを低地オアシス、ドライバレー地域のライト谷やティラー谷にみられるものを山岳・谷オアシスとしている(図2)。

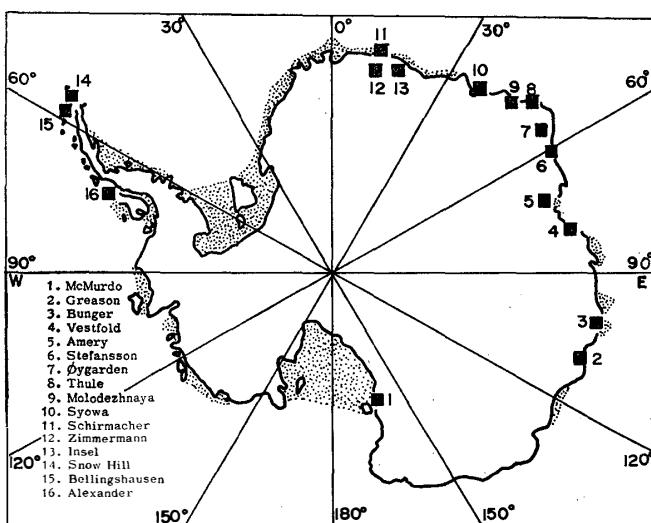


図2 南極オアシスの分布 (SIMONOVによる)

Fig. 2. Antarctic oases (after I.M. SIMONOV).

3.2. 特 徵

塩湖は、いずれも他の大陸のものと同じく無排出湖で、その特徴を表3にあげた。沿岸オアシスの塩湖は湖面高度が海面下にあって、周辺地形に隆起汀線がみられること、湖岸近くの堆積層にはミラビライト ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)、テナルダイト (Na_2SO_4)、カルサイト (CaCO_3)、石こう ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)などの塩類堆積物や貝化石（海洋性生物遺体）が存在すること、湖水の主成分の塩化物イオン比が海水のそれと近似するなど、地学的にも化学組成からも明らかに海跡湖とみられるものが多い。これに反して、山岳・谷オアシスの塩湖は、湖によって水質が著しく相違し、海水組成に近いもの、カルシウムに富み高塩濃度の石油塩水に似たもの、あるいはマグネシウムが多く死海の水質に近いものなどがある。化学組成から単純にその塩起源を論じがたい。しかし、塩湖の周辺には旧湖岸線が顕著にみられるところが多く、また周辺一帯にミラビライト、カルサイト、ハライト、石こう、硝石など、さまざまな塩類堆積物がみられる。これは過去の気候変動のころ、湖水面が大きく変動するとともに、高塩分の湖水が低温濃縮したことを物語るものである。

表3 塩 湖 の 特 徵
Table 3. Characteristics of Antarctic saline lakes.

	Geomorphological		Chemical		
	Lake elevation	Evaporites	M/Cl	Stable isotope ratio, δD , $\delta^{18}\text{O}$	Nutrient elements
Coastal lakes	Below sea level	Mirabilite, calcite, fossil shell	Similar to sea water, chloride type	Similar to sea water	Similar to sea water
Lakes in the Dry Valleys	Above sea level, +12 m ~ +122 m	Mirabilite, calcite, halite, gypsum, sodium nitre	Deviate from sea water Chloride type	Similar to continental ice	Rich in N-compounds

沿岸オアシスの代表的な塩湖として、舟底池について述べる。池は湖面高度がおよそ -25 m で、水深は約 9.2 m と浅い。池の大きさは長さ約 750 m、幅 250 m で、海とは海拔高度 5 m ほどの小さい鞍部でへだてられている。池の南西には、貝化石を含む砂礫層が 2 m ほどの低いマウンドをなしており、シルトおよび粘土層のほか、塩類堆積物としてミラビライト、テナルダイト、カルサイトなどが存在する。湖面から 12 m ほど高いところに、旧湖岸線にあたる平坦なステップもみられ、この塩湖が海跡湖であることを明らかにしている。図 3 に舟底池の模式断面図を示すが、生物遺体の放射性炭素法による年代測定によると、湖岸 (-23 m) の *Laternula elliptica*、湖岸から 31 m 高い地点の軟体類の貝化石は、それぞれ

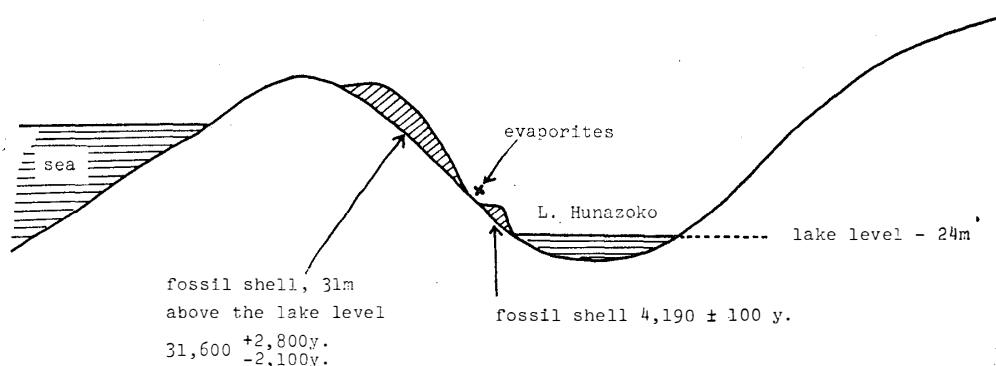


図3 舟底池の模式断面図（吉田栄夫による）

Fig. 3. Schematic profile of Lake Hunazoko (after Y. YOSHIDA).

$4,190 \pm 100$ 年, $31,600 \pm 2,800$ 年と 2 群の年代にわけられることが明らかにされた。このことから、この地域の大陸氷の大きな後退は、30,000 年以前に起こり、その後海水の影響をうけたことが推察されている。

4. 水質の考察

著者らが調査した昭和、マクマード各オアシスの塩湖と、さらに最近オーストラリア隊からえたベストフォールド・オアシスの塩湖分析結果から代表的なものをえらび、表4にその化学組成を示す。これによると、湖水の塩分濃度は、海水より濃度の低い数 100 mg/l のものから、海水の数倍という高塩分のものまであるが、その水質は沿岸オアシスのものと山岳・谷オアシスのものとの間に、大きな相違があることがわかる。

4.1. 沿岸オアシスの塩湖

すでに述べたように、大陸沿岸に存在する塩湖は、すべて海跡湖とされるが、これを化学組成からみても、海水の低温濃縮過程を経た水質であることが明らかとなる。すなわち、湖水の塩分濃度が海水より高くても、その主成分と塩化物イオンとの比が海水のそれと類似する傾向を示す。とくに、ぬるめ池のように海と近接する塩湖では、その水質が海水ときわめて似ており、その小さな濃縮比は塩湖の生成が比較的新しいことを示唆する。塩湖の濃縮係数は湖沼によって異なるが、昭和オアシスの塩湖では、塩化物イオン、マグネシウムイオンなどを海水と比較すると、すりばち池、ざくろ池（ラングホブデ）では約 6 倍、舟底池では約 4 倍程度濃縮されていることがわかる。また一部の塩湖、たとえば舟底池、ディープ湖などでは、ナトリウム、カルシウム、硫酸イオンなどの塩化物イオンに対する比は、海水のそれより小さいが、これは湖水から前述の塩類堆積物が低温下で析出したと解釈すれば理解で

表 4 塩湖の化学組成
Table 4. Chemical composition of Antarctic saline lakes.

Lake	Lake Vanda	Lake Fryxell	Lake Bonney east lobe	Lake Bonney west lobe	Deep Lake	Oval Lake	Lake Nurume	Lake Hunazoko
Oasis	McMurdo				Vestfold		Syowa	
Sampling date	72-12-9	72-12-20	72-1-4	72-1-9	74-12-2	74-4-30	69-1-25	67-10-6
Lake level (m)	93.6	12	56	56	-56	-27	-0.5	-25
Maximum depth (m)	68.5	18	33.4	30.2	36	—	6	9.2
Sampling depth (m)	64.6	16	32.5	29.5	30	0	6	2.5
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	24.3	1.6	-2.4	-4.6	-13.0	-9.0	12	-15.7
pH	5.45	7.07	6.51	5.73	7.44	7.63	8.16	7.26
sp. gr. (25°C)	1.092	1.00	1.203	1.102	1.175	1.100	1.030	1.146
Na (g/kg)	6.11	2.980	56.9	32.1	59.1	44.9	12.1	58.2
K "	0.59	0.203	2.30	1.47	3.95	0.79	0.53	2.4
Ca "	24.40	0.027	1.22	1.48	2.19	1.91	0.56	2.22
Mg "	7.40	0.331	21.71	8.34	12.2	5.52	1.54	7.87
Cl "	74.28	3.710	161.5	78.12	137.4	80.43	23.05	116.6
SO ₄ "	0.615	0.253	2.95	4.45	2.50	2.36	3.09	2.47
Br "	0.020	0.0111	1.24	0.375	0.587	0.301	0.0761	0.391
HBO ₂ "	0.012	0.009	0.108	0.078	0.139	0.038	0.018	0.086
Br/Cl $\times 10^{-3}$	0.27	2.99	7.68	4.80	4.27	3.74	3.30	3.35
HBO ₂ /Cl $\times 10^{-4}$	1.62	24.3	6.69	9.98	10.1	4.72	8.03	7.39

Remarks: sea water Br/Cl 3.43×10^{-3} , HBO₂/Cl 9.69×10^{-4} .

きる。

沿岸地帯の塩湖は大小を問わず冬季に湖面が結氷し、夏季には解氷する。したがって長い年月のうちに湖水は、夏季には湖水からの蒸発、冬季には湖水面からの昇華がくりかえされ、しだいに濃縮し現在に至ったものと考えられる。海水が冷却されたり、あるいは蒸発する場合に、臭素は固相あるいは気相に移行せずに母液に残るとされている。

沿岸地帯の塩湖について Br/Cl 比をみると、ディープ湖では海水に比べて大きく、またぬるめ池や舟底池ではやや低い値となっている。KERRY *et al.* (1974) によると、現在のディープ湖の水量は過去に比べて $1/7$ に濃縮されているとし、また GILL (1955) によると、ペストフォールド・オアシスの大陸氷の後退、それにつづく地殻均衡による地盤隆起やユースタチック運動による海面低下が生じたのは、4,000~7,000 年以前としている。Br/Cl 比が海水のそれより大きなことは、ディープ湖などが舟底池より塩湖生成の歴史が古く、また濃縮過程が進んでいるのかも知れない。

ホウ素については、低温濃縮過程で臭素と同じ挙動をとるが、その塩化物イオン比が臭素と異なっており、現在検討中である。

4.2. 山岳・谷オアシスの塩湖

ドライバレー地域の主な塩湖、ライト谷のパンダ湖、テイラー谷のフリクセル湖、ボニー湖の水質を検討すると、谷によって、また存在する位置によって主成分を異にし、複雑な様相を示している。しかし、この地域の塩湖は、いずれも年間を通じて湖面が結氷しており、その塩分濃度が表層近くでは低く、底層ほど高塩分となっている。酸素、水素などの安定同位体比をみると、現在の湖水はいずれも周辺氷河からの融氷水によって涵養されていることが明らかにされている。

主成分の塩化物イオン比は、一般に海水のそれからはずれるが、テイラー谷の末端近くに位置して、マクマード入江にもっとも近いフリクセル湖は、他の塩湖と違って海水組成に近似しており、地形的考察とあいまって、この湖がかつて海水の影響をうけたことが考えられる。しかし、臭素やホウ素の塩化物イオン比が海水のそれと著しく異なるのは、他の要因によるのであろう。

フリクセル湖からさらに南西 10 km 内陸側に位置するボニー湖は、東西 2 つの湖が狭い水路でつながっていて、主成分はナトリウム、マグネシウムおよび塩化物イオンで、その合計は全溶解成分の 92% 以上をしめる。しかし、両湖の化学組成は相違し、西湖ではナトリウムとマグネシウムとの比が東湖と逆転し、またカルシウムと硫酸イオンの塩化物イオンに対する比も東湖の 2 ~ 3 倍を示していて、いずれも海水の化学組成と異なった水質を示している。

ドライバレー地域の塩湖は、今までの調査から、湖盆に濃縮された塩類堆積物が再溶出して現在の塩湖が形成されたと考えられている。ボニー湖においては、西湖には石こう、東湖には多量の食塩が湖底に存在するが、東西両湖の化学組成の相違については、TORII *et al.* (1975) は安定同位体比の研究から、塩湖生成の年代の差として解釈している。とくに、東湖の臭素と塩化物イオンとの比が西湖に比べて大きいのは、東湖の湖底に堆積する食塩の析出によって説明できる。

4.3. 総括

以上に示すように、山岳・谷オアシスの塩湖は沿岸地帯のものに比べて化学組成が非常に異なることがわかる。図 4 の三角図に、南極の主な塩湖の水質を表示してみた。ナトリウ

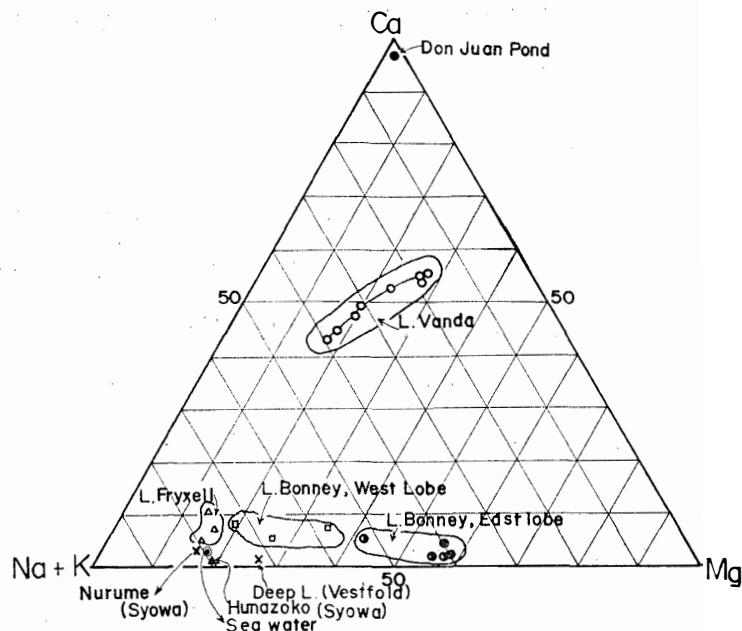


図 4 南極 塩湖の水質

Fig. 4. Relations of Ca, Mg and Na+K in the Antarctic saline lakes.

ム、カルシウム、マグネシウムの当量組成を%で示したものであるが、海水はナトリウムが多くカルシウムが少ない位置にある。これによると、舟底池やディープ湖、フリクセル湖などは、海水に近い組成のものであることがわかる。一方、マクマード・オアシスの他の塩湖は、たとえばマグネシウムが多いボニー湖、カルシウムがきわめて多いバンダ湖のように、海水の低温濃縮が進む方向の組成に近づくものもあるが、たんにこれだけでは説明できない。その塩分の由来を考えるとき、岩石の風化作用、露岩地帯に堆積する塩類析出物、風送塩、それに湖を涵養する大陸氷中に含まれる塩分などが考慮されねばならない。

最近実施されたドライバレー掘削プロジェクト (DVDP) によって、バンダ湖、トンファン池、フリクセル湖の3つの塩湖において掘削が行われた。今までの調査結果は、このドライバレー地域の渓谷がかつてフィヨルドであったとする WEBB (1972) の説を支持するものがあって、南極の塩湖の成因はすべて気候変動によって生じた大陸地形の変化から生まれたもので、塩分の大部分は海水に由来するものと考えてよい。ドライバレー地域の塩湖の水質が海水と異なることは、沿岸オアシスの塩湖に比べてはるかに歴史が古く、長年月の経過のうちに水質がしだいに周辺からの塩分の供給、あるいは離脱があって変化したものであろう。

5. おわりに

南極大陸に発見された多くの塩湖は、調査が進むにつれてその成因が地球化学的にも解明され、またこれは地形、地質、気象など他の部門の調査結果とあいまって、大陸の古気候学、地史の変遷などの研究が急速に進められるいとぐちともなった。

しかし、湖沼学の立場からみると、低温地域に存在するこれらの塩湖について、水収支、水循環における生物の役割など、いくつかの研究課題が残されている。さらに、地球化学的見地からは、低温下における物質循環についての多くの知見もえられると思われる所以、新しい角度から塩湖の調査がとりあげられることを望むものである。

文 献

- GILL, E. D. (1955): Radiocarbon dates for Australian archeological and geological samples. *Aust. J. Sci.*, **18**, 49–52.
- KERRY, K. R., WILLIAMS, R., GRACE, D. R. and BURTON, H. R. (1974): Ecology of some saline lakes of the Vestfold Hills, Antarctica. Volume of Abstracts, Third Symposium on Antarctic Biology, 51.
- SIMONOV, I. M. (1971): Oazisy vostochnoy Antarktidy (The oases of eastern Antarctica). Leningrad, Gidrometeorologicheskoe, 176 p.
- 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.
- 綿拔邦彦 (1975) : 南極の地球化学—南極における地球化学的研究. 地球化学, **9**, 16–21.
- WEBB, P. N. (1972): Wright fjord, pliocene marine invasion of an Antarctic Dry Valley. *Antarct. J. U. S.*, **7**, 96–97.
- 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.