

南極南ビクトリアランドのドライバレー地域における 塩湖のストロンチウム濃度

三好登和子*¹・今橋正征*¹・鳥居鉄也*²

Strontium Concentrations in Saline Lake Waters in the Dry Valleys Region of Southern Victoria Land, Antarctica

Towako MIYOSHI*¹, Masayuki IMAHASHI*¹ and Tetsuya TORII*²

Abstract: The Sr concentrations of saline lake waters collected from the Dry Valleys region of Victoria Land were determined and the Sr/Ca ratios were evaluated. These waters have various Sr/Ca ratios ranging from 0.0 to 4.56×10^{-2} . It was observed that the Sr/Ca ratios of inland lake waters were smaller than those of the lakes near the Ross Sea. On the basis of the Sr/Ca ratios the origin of lake waters in the Dry Valleys region is summarized as follows:

1) The water in Lake Fryxell was originated from evaporated seawater under frigid conditions, because the Sr/Ca ratio of the water, about 3 to 4×10^{-2} , is similar to that of evaporated seawater from which halite is deposited. This water may have been formed by mixing of the evaporated seawater with glacial meltwater. It is likely that the water in Lake Bonney was also formed in a similar manner to that of Lake Fryxell.

2) The water in Lake Vanda was originated from glacial meltwater containing dissolved marine evaporites. The evaporites such as calcite and gypsum in the valley may have been formed under frigid conditions as delineated by T. G. THOMPSON and K. H. NELSON (Am. J. Sci., 254, 227, 1956).

3) The water in the Labyrinth area was probably originated from the dissolution of air-borne salts by glacial meltwater and snowfall and the waters driven from fresh water-basalt interactions.

要旨: 南 Victoria Land の Dry Valley 地域には多くの塩湖が点在する。それら塩湖水中のストロンチウム濃度を測定したところ、0.0-1630 mg/l であった。そこでそれらの Sr/Ca 比を求めたところ、0.0- 4.56×10^{-2} の範囲で、内陸の塩湖水の Sr/Ca 比は Ross 海に近い塩湖水の比よりも低いことが明らかになった。Dry Valley 地域の塩湖の塩起源を Sr/Ca 比をもとに、次のように要約した。

1) Fryxell 湖の塩類は海水に起因する。すなわち、湖水の Sr/Ca 比、約 $3-4 \times 10^{-2}$ は halite が蒸発析出した海水の比に似た値である。現在の塩水は、塩分が 1/5 ほどであるので、蒸発した海水と氷河融水との混合により形成したと思われる。Bonney 湖の塩類もまた Fryxell 湖と同じような変化を経て生成したと考えられる。

2) Vanda 湖は、岩石風化で生じた塩類や海水起源の塩類析出物を含んでいる氷河融水と、Onyx 河川水で形成された。谷中に分布する calcite や gypsum のような塩類析出物は、T. G. THOMPSON と K. H. NELSON (Am. J. Sci., 254, 227, 1956) により行われた低温下での凍結濃縮で海水から生成されたと思われる。

3) Wright 谷上流域の Labyrinth 地帯の湖沼水は、氷河融水や降雪による風送塩の溶解や、玄武岩といくぶん反応した水から生じたと考えられる。

*¹ 東邦大学理学部化学科。Department of Chemistry, Faculty of Science, Toho University, 2-1, Miyama 2-chome, Funabashi 274.

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

1. はじめに

Ross 海に面した南 Victoria Land の山地には、南極最大の McMurdo オアシスと呼ばれる無氷雪乾燥露岩地帯が広がっている。このオアシスの中心部が Dry Valley 地域で、南極大陸の地学の重要な研究の場となっている。

Dry Valley 地域には西の内陸氷原から東の Ross 海に走る Victoria 谷, Wright 谷, Taylor 谷が存在し、多くの塩湖、氷河湖や池が点在している。この中には、溶存塩類として 400 g/kg 近くも含むもの (Don Juan 池: 390.6 g/kg, 楠ら, 1973) もいくつかある。この地域の塩湖は、化学組成も多様であり、多くの研究者がその塩起因を探るための調査を行ってきた (例えば鳥居ら, 1966, 1967; 山県ら, 1967)。なかでも、カルシウムを主成分とする Vanda 湖、マグネシウムに富んだ Bonney 湖は、それらの水の特異な化学組成のため、多くの研究者によりその起源が考察されてきた。成因の研究法には安定同位体を用いたもの (例えば, RAGOTZKIE and FRIEDMAN, 1965; CRAIG, 1966; MATSUBAYA *et al.*, 1979)、主成分元素を用いたもの (中井ら, 1975; 森川・小坂, 1975; MORIKAWA *et al.*, 1975) など多くある。またストロンチウムの同位体を用いたもの (例えば, FAURE and JONES, 1974; JONES and FAURE, 1978) もある。Dry Valley 地域の水系の多くには、海水がなんらかの形で関与していることが報告されているが、現在の湖沼水は氷河融水などにより涵養されていることが、確かめられている (MATSUBAYA *et al.*, 1979)。

今回、日本隊が採集したこの地域の湖沼水中のストロンチウム濃度を測定し Sr/Ca 比を求めたところ、かなりの変動がみられた。塩湖の周辺には、ストロンチウムを選択的に取り込む鉱物、すなわち gypsum, calcite, aragonite 等が多く存在するが、これらの二次鉱物とあわせて主に湖水中の Sr/Ca 比からこれらの地域の湖沼水の塩起源を考察した。

2. 試料および分析法

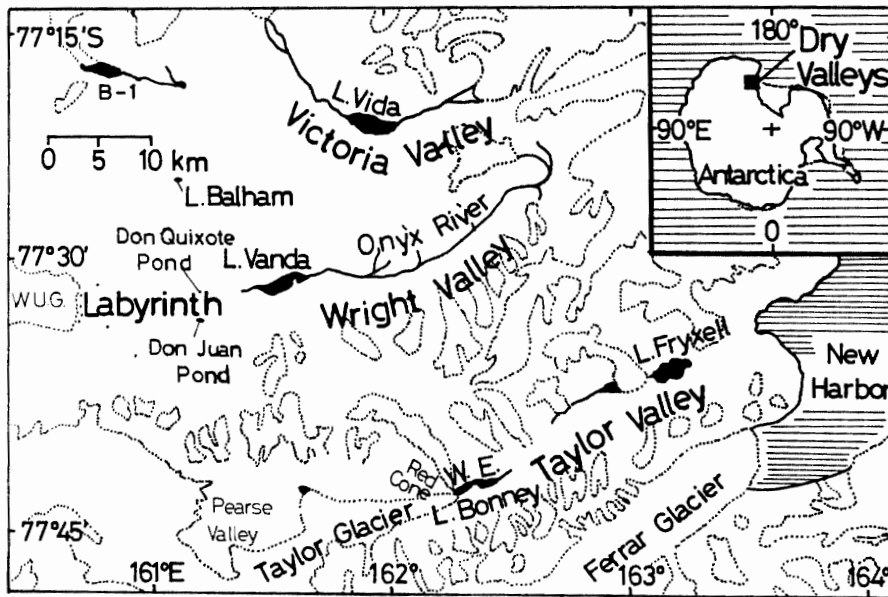
2.1. 試料

試料水は、1974 年から 1987 年にかけて日本隊が採集したものを使用した。ストロンチウムの分析を行った試料水は、Dry Valley 地域、Taylor 谷の Fryxell 湖, Bonney 湖, Wright 谷の Vanda 湖, Don Juan 池および Labyrinth 地帯の湖沼水等である (図 1)。

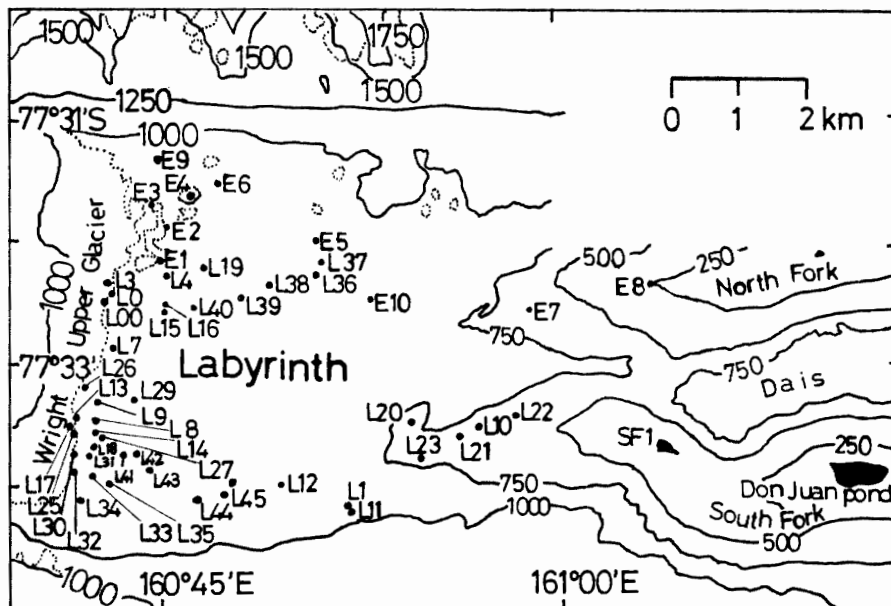
2.2. ストロンチウムの定量

試料水の塩濃度の高いものは、あらかじめストロンチウムをシュウ酸カルシウムと共沈させて分離したのち測定した。

カルシウムとして 50–70 mg 含むように試料を分取 (含有カルシウム量が少ないときは、塩化カルシウム溶液を添加) し、シュウ酸カルシウムにストロンチウムを共沈させた。沈殿分離後、沈殿に炭酸ナトリウム溶液を加え複分解を行い、炭酸塩に変化させた。熱水で洗浄



a. Dry Valleys region.



b. Labyrinth area.

図 1 南極 Dry Valley 地域
Fig. 1. The Dry Valleys region, Antarctica.

後、沈殿を塩酸で溶解し定容とした後、原子吸光分析法で測定した。この方法でストロンチウムは 100-97% の共沈率で測定できることを確かめた。

2.3. 他の主要成分の定量

一部の試料水について、カルシウムは NN 指示薬を、マグネシウムは EBT 指示薬を用いた EDTA 滴定法で定量した。他の分析値については、共同研究者により測定されたものを使用した。

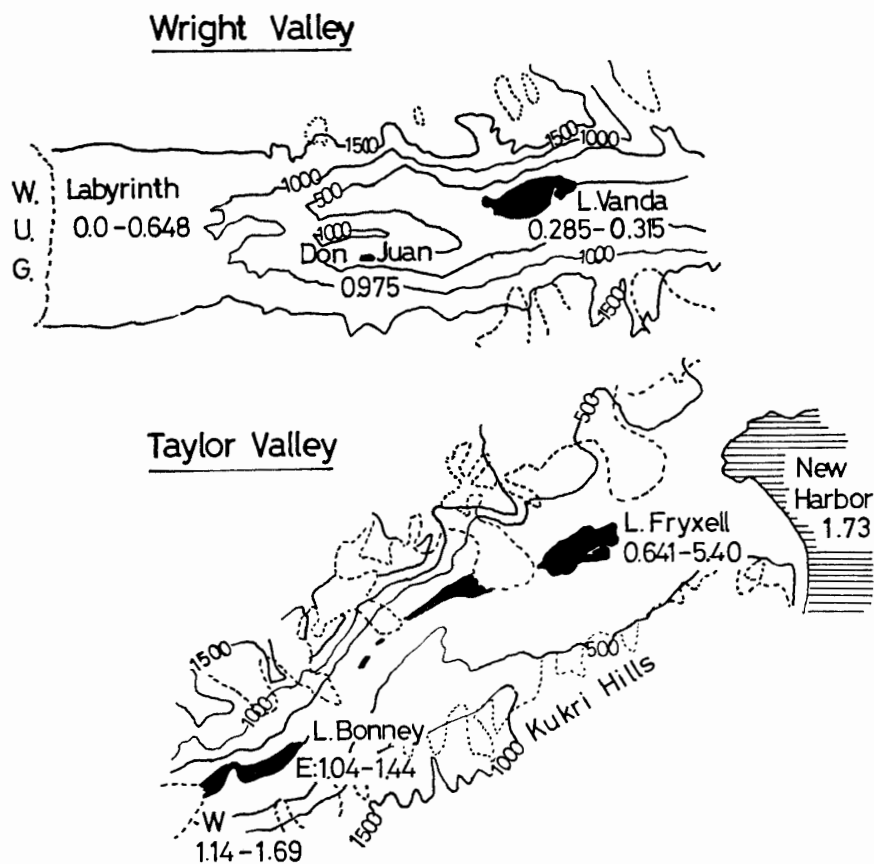


図 2 塩湖水中の Sr/Ca 比 ($\times 10^{-2}$)
 Fig. 2. The Sr/Ca ratios ($\times 10^{-2}$) in each saline lake waters.

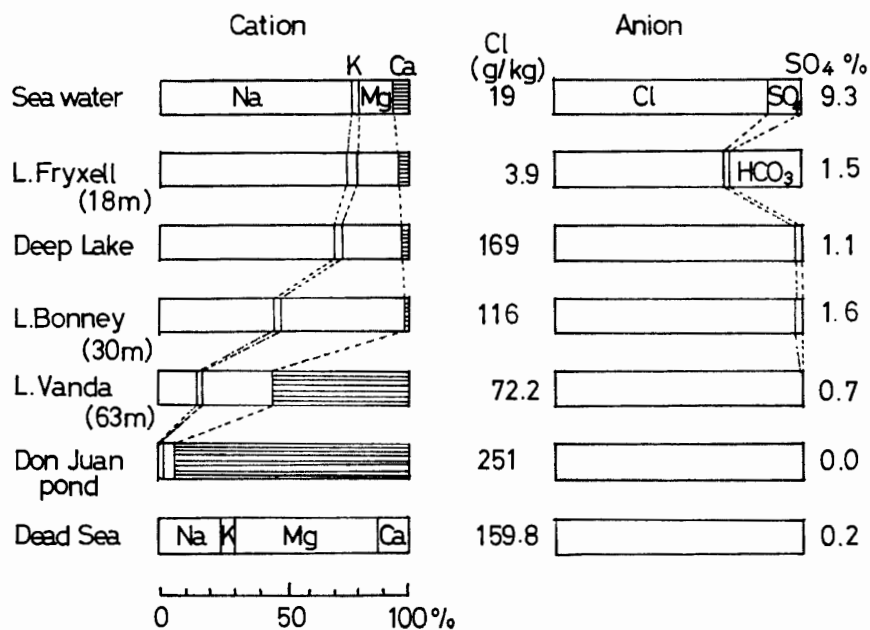


図 3 塩水の化学組成 (山県ら, 1967)
 Fig. 3. Chemical composition of saline waters (YAMAGATA et al., 1967).

3. 結果と考察

各湖水中のストロンチウム濃度および他成分の濃度を表 1 に示した。

ストロンチウム濃度は Vanda 湖のような比較的大きな塩湖については高い(底層水で 71.6 mg/l)。また, Wright 谷 South Fork に位置する Don Juan 池は東西 700 m, 南北 300 m, 水深 10 cm という小さな池で, 塩分濃度が 390 g/kg ときわめて高いが, ストロンチウム濃度も 1630 mg/l と非常に高い値を示した。しかし, 氷河融水や淡水池は, その濃度がきわめて低かった。一方, 標高 800–1000 m の高所に位置する Labyrinth 地帯の湖沼水では最高 10 mg/l 程度で, 淡水池では検出限界以下の湖沼水が多かった。ストロンチウム濃度はカルシウム濃度に依存すると考えられるので, 各湖水の Sr/Ca 比(濃度比)を地図上に示した(図 2) ところ, 内陸(Labyrinth) 側に向かうほど値が低くなる傾向がみられた。

3.1. Fryxell 湖

Taylor 谷の東端, Ross 海に近く位置する Fryxell 湖は, Br/Cl 比や主要成分の組成など, 海水に最も近い水質の塩湖である(ANGINO *et al.*, 1962; TORII and YAMAGATA, 1981)。図 3 に山県ら(1967)の示した Dry Valley 地域の塩湖の化学組成の比較を示したが, Fryxell 湖の主成分は塩化ナトリウム型で, Dry Valley 地域の塩湖中で最も海水に近い組成をもつことがわかる。今回 Sr 濃度を測定し, Ca との比をとって考察したところ, 表層より 7.5 m 深までは海水の比に近く, 深度を増すとともに海水の比(1.73×10^{-2})より底層水で約 2 倍近い(約 4×10^{-2})大きな値を示した。

表 2 に各温度で海水を蒸発濃縮したときの残留海水の Sr/Ca 比を示した。gypsum 析出点から halite 析出点の間で Sr/Ca 比が増大する傾向があった。これは炭酸カルシウムや硫酸カルシウムなどと水溶液間のストロンチウムの分配関係数 D_{Sr} が 1 より小さい(CaCO_3 : <0.1 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: <0.3)ためであり, これらの鉱物が沈殿した残液がこれらの塩湖の起源となっていることを示している。また, 高温濃縮ではあるが, 蒸発過程中に沈殿する鉱物の違いで, 残留塩水の Sr/Ca 比がかなり違うこと, また, Mg/Ca 比をみると, 海水の比(3.17)よりも若干高めであることなどからも, これらの鉱物が沈殿した残液が起源であることがいえる。

Sr/Ca 比が高いことから, Fryxell 湖は古い海水が濃縮され, 炭酸カルシウムや gypsum が沈殿してカルシウムが取り除かれたあとの海水を源としていると考えられる。また, Fryxell 湖水は海水の 1/5 ほどの塩濃度であるので, 濃い塩水が氷河の融水や降雪などの天水でうすめられたのであろう。JONES and FAURE (1978) は, Fryxell 湖の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を測定しているが, 0.7090 という, 現海水の 0.7090 ときわめて近い値は, Fryxell 湖水が海洋起源であることを示唆している。

表 1 Dry Valley 地域の塩水のストロンチウムと他の成分
 Table 1. Strontium and other components in some saline waters from the Dry Valleys region.

Sample	Depth (m)	Date	Sr (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/kg)	Cl (mg/kg)	SO ₄ (mg/kg)	Sr/Ca ($\times 10^2$)
Labyrinth									
L-00	0-0.5	21 Dec. '85	0.04	21.4	4.72	16.7	19.4	74.3	0.2
	0.57-0.83	21 Dec. '85	n.d.	9.2	1.82	10.0	11.1	27.5	—
	0.83-1.00	21 Dec. '85	0.07	32.4	5.07	23.7	26.1	98.0	0.2
	1.00-1.23	21 Dec. '85	0.07	24.3	5.73	28.8	27.5	96.0	0.3
	1.23-1.52	21 Dec. '85	n.d.	9.9	1.42	9.56	10.3	30.3	—
	1.80-2.00	21 Dec. '85	n.d.	0.6	6.20	12.2	28.2	9.2	—
	2.22-2.36	21 Dec. '85	n.d.	1.0	3.80	4.54	14.7	3.3	—
	2.36-2.60	21 Dec. '85	n.d.	5.2	2.01	8.72	12.7	20.2	—
L-0-1	0.95	21 Dec. '85	5.33	1040	6040	11200	20400	8350	0.513
L-0-2	0.65	23 Dec. '85	1.59	371	882	17100	3080	2280	0.428
L-1	surface	3 Jan. '77	3.00	540	1920	4130	7580	2130	0.556
L-4	surface	20 Dec. '80	3.29	865.9	4705	9800	17400	5120	0.380
	surface	14 Dec. '84	4.81	1102	10300	14400	37200	4840	0.436
L-7	surface	4 Jan. '83	0.62	694	5040	10700	15780	896	0.090
	surface	6 Jan. '82	n.d.	11.8	65.5	230	390	30	—
	bottom	6 Jan. '82	0.50	151	1118	2920	5360	261	0.33
L-8	surface	22 Dec. '85	0.12	70.1	222	587	1040	267	0.17
L-9	0.40	22 Dec. '85	0.61	322	1780	3780	7170	1650	0.19
L-11	0.12	5 Jan. '82	3.98	973	1705	1970	5890	990	0.409
L-12	surface	5 Jan. '82	n.d.	17.8	10.1	30.8	50.2	37.1	—
L-12-1	surface	28 Dec. '83	0.07	25.8	17.5	60.3	78.3	99.6	0.2
L-13	0.15	5 Jan. '82	n.d.	11.5	9.8	69.8	82.5	80.0	—
L-13-S	0.83	22 Dec. '85	0.57	160	275	1290	1510	1300	0.35
L-13-N	0.74	22 Dec. '85	0.43	118	215	1130	1230	1110	0.36
L-14	0.05	5 Jan. '82	0.74	490	2881	5950	10400	3790	0.15
L-14	0.15	5 Jan. '82	0.92	470	2710	5950	10400	3790	0.20
L-15	surface	4 Jan. '83	2.81	602	2427	6570	5020	13100	0.467
	surface	4 Jan. '82	0.0	391	1620	1400	2903	5420	0.0
L-15	0.10	6 Jan. '82	3.45	634	2183	6570	5020	13100	0.544

表 1 つ づ き
Table 1. (Continued)

Sample	Depth (m)	Date	Sr (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/kg)	Cl (mg/kg)	SO ₄ (mg/kg)	Sr/Ca (×10 ²)
L-16	surface	6 Jan. '82	n.d.	8.64	11.8	24.5	47.8	25.0	
L-16	surface	24 Dec. '83	0.05	19.6	44.6	92.0	169	57.0	0.3
L-17	surface	23 Dec. '83	n.d.	1.50	2.10	6.4	11.1	7.20	—
	1.38	22 Dec. '85	n.d.	2.1	2.18	9.89	13.6	6.10	—
L-18	inflow	23 Dec. '83	n.d.	2.60	2.83	3.44	2.14	6.80	—
L-19	surface	24 Dec. '83	4.45	839	6780	14800	26700	8770	0.530
L-20	surface	27 Dec. '83	n.d.	4.50	10.0	42.5	93.6	15.0	—
L-22-1	surface	27 Dec. '83	n.d.	18.4	49.1	120	231	42.0	—
L-25	puddle	22 Dec. '85	n.d.	5.60	3.78	13.2	20.3	18.5	—
L-26	0.10	27 Dec. '85	n.d.	13.1	19.8	110	134	85.0	—
L-27	0.05	27 Dec. '85	0.05	57.9	194	753	941	437	0.09
L-28	surface	27 Dec. '85	0.04	48.7	161	542	743	345	0.08
L-29	surface	27 Dec. '85	n.d.	7.94	11.4	38.8	53.6	33.5	—
L-30	0.10	27 Dec. '85	n.d.	1.10	1.09	6.67	8.76	3.00	—
L-31	0.10	27 Dec. '85	n.d.	5.21	13.1	42.4	75.5	8.40	—
L-32	0.20	27 Dec. '85	n.d.	4.44	3.06	12.6	15.7	20.0	—
L-33	0.40	27 Dec. '85	n.d.	3.50	2.28	9.17	8.94	14.5	—
L-34	0.15	27 Dec. '85	3.36	944	2530	69700	11500	4430	0.356
L-35	0.06	27 Dec. '85	2.30	778	2870	8650	14500	3450	0.269
L-36	0.05	28 Dec. '85	0.18	71.2	338	941	1500	411	0.25
L-37	0.05	28 Dec. '85	0.98	287	1920	4790	8570	1720	0.34
L-38	0.05	28 Dec. '85	0.17	87.9	313	1010	1430	657	0.19
L-39	0.05	28 Dec. '85	0.76	326	1170	3070	5140	1800	0.23
L-40	0.10	28 Dec. '85	n.d.	19.1	29.6	89.5	103	128	—
L-42	0.05	31 Dec. '85	1.05	348	1030	3730	5120	2280	0.30
L-43	0.05	31 Dec. '85	n.d.	14.1	13.7	84.1	66.7	109	—
L-44	0.20	31 Dec. '85	10.6	1630	2210	4620	10600	483	0.648
L-45	0.10	31 Dec. '85	0.20	78.3	217	604	1010	322	0.25
E-1	0.79	24 Dec. '85	4.04	891	5050	10300	19100	4970	0.453
E-3	surface	13 Dec. '84	n.d.	1.00	0.75	7.55	3.70	8.00	—

表 1 つ づ き
Table 1. (Continued)

Sample	Depth (m)	Date	Sr (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/kg)	Cl (mg/kg)	SO ₄ (mg/kg)	Sr/Ca (×10 ²)
		24 Dec. '85	1.51	271	112	1170	392	2600	0.557
	inflow	24 Dec. '85	n.d.	2.5	1.19	1.42	1.6	7	—
E-4	0.40	24 Dec. '85	n.d.	1.81	2.88	6.33	10.3	12.4	—
E-5		28 Dec. '85	1.93	1288	3040	7860	14400	3710	0.149
E-7		17 Dec. '84	n.d.	2.10	5.66	24.0	48.1	24.2	—
E-9	0.73	24 Dec. '85	n.d.	1.10	1.81	11.2	9.28	10.8	—
E-10	0.10	28 Dec. '85	0.575	142	550	1970	3030	973	—
W. U. Gl.		26 Dec. '85	n.d.	0.124	0.048	0.650	1.22	2.00	—
W. U. Gl.		26 Dec. '85	n.d.	0.062	0.024	0.210	0.40	0.120	—
Upper Victoria Valley									
B-1		21 Dec. '82	4.84	1070	5860	9960	17080	1900	0.452
		7 Jan. '82	5.87	1007	5231	7200	16100	2360	0.583
			6.30	1048	5559	—	—	—	0.601
L. Balham	2.8	8 Jan. '82	1.19	450	428	800	1350	1490	0.264
	puddle	8 Jan. '82	n.d.	361	250	500	814	1250	—
		8 Jan. '82	0.68	423	386	—	—	—	0.16
Taylor Valley									
Commonwealth Glacier		26 Dec. '74	n.d.	4.81	10.6	—	—	—	—
Canada Glacier		27 Dec. '74	n.d.	4.67	4.40	—	—	—	—
Wright Valley									
SF-1	surface	30 Dec. '83	n.d.	26.4	13.7	45.0	62.9	133	—
Don Quixote P.		14 Dec. '74	1.07	260	1078	—	—	—	0.412
L. Canopus		5 Jan. '86	0.04	8.41	18.0	—	—	—	0.476
Don Juan P.		28 Dec. '86	1630	167100	2496	5320	—	—	0.975

表 1 つ づ き
Table 1. (Continued)

Sample	Depth (m)	Date	Sr (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Sr/Ca ($\times 10^2$)	Mg/Ca
L. Fryxell	5	10 Dec. '85	0.54	28.2	18.1	1.9	0.641
	7.5		0.68	40.2	56.9	1.7	1.42
	10		1.21	48.2	135	2.51	2.80
	12.5		2.07	45.4	230	4.56	5.06
	15		1.90	60.1	280	3.16	4.67
	17.5		2.01	58.7	317	3.42	5.40
	18.5		2.48	67.1	289	3.69	4.31
L. Bonney East lobe	5	24 Dec. '76	0.78	74.7	—	1.04	—
	10		3.15	258	1011	1.22	3.92
	15		9.30	752	11040	1.23	14.7
	19		18.2	1258	—	1.44	—
	25		23.1	1715	30900	1.35	18.0
	30		24.7	1760	—	1.40	—
West lobe	5	21 Dec. '76	0.86	74.8	—	1.14	—
	8		1.89	170	320	1.11	1.88
	13		18.2	1344	6139	1.35	4.57
	18		20.5	1359	—	1.51	—
	25		20.0	1415	9439	1.41	6.67
	30		23.0	1360	—	1.69	—
L. Vanda	60	14 Dec. '76	46.5	18260	5955	0.255	0.326
	5	16 Dec. '83	0.30	93.9	29.2	0.32	0.311
	10		0.30	98.0	34.1	0.31	0.348
	30		0.41	148	44.3	0.27	0.299
	40		0.42	167	41.7	0.25	0.250
	50		1.72	759	217	0.227	0.285
	55	15.7	6959	2160	0.226	0.310	
	58.26	3 Dec. '83	28.4	11660	3689	0.244	0.316
	60		40.1	16260	5259	0.247	0.323

表 1 つ づ き
Table 1. (Continued)

Sample	Depth (m)	Date	Sr (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Sr/Ca ($\times 10^2$)	Mg/Ca
L. Vanda	65	19 Dec. '83	61.2	23460	7590	0.261	0.324
	68.5		66.4	24000	7723	0.277	0.322
	68.89	3 Dec. '83	75.0	26430	8500	0.284	0.322
	69		71.6	26040	8272	0.275	0.318
	5	4 Jan. '87	0.31	96.1	28.3	0.32	0.294
	20		0.31	99.6	28.4	0.31	0.285
	40		0.42	153	45.7	0.27	0.299
	50		0.98	426	114	0.23	0.268
	55		7.23	3060	910	0.236	0.297
	57.5		15.6	6805	2066	0.229	0.304
	60		27.8	11370	3556	0.245	0.313
	62.5		39.8	15690	4927	0.254	0.314
	65		50.3	19200	6056	0.262	0.315
	67.5		57.9	21960	6792	0.264	0.309
	69.5		68.7	24860	7633	0.276	0.307

* Sr/Ca and Mg/Ca: weight ratio

* W. U. Gl.: Wright Upper Glacier

* n.d.: not detected

* Strontium and calcium concentrations, and Sr/Ca ratio in Ross seawater collected on 19 Dec. '86 were 7.40 mg/l, 427 mg/l and 1.73×10^{-2} , respectively.

表 2 海水の蒸発・溶液あるいは固体中の Ca, Sr, Na の濃縮
 Table 2. Evaporation of seawater: concentrations of Ca, Sr and Na in solution or solid.

Temp. of evaporation (°C)	Degree of evap. (%)	Ca		Sr		Na solid (%)	Sr/Ca ($\times 10^2$)		Na/Ca solid	D_{Sr}
		soln. (mg/l)	solid (%)	soln. (mg/l)	solid. (%)		soln.	solid		
23-30	0	402	—	7.75	—	—	1.93	—	—	—
	75	1465	—	20.8	—	—	1.42	—	—	—
	80	1330	—	22.9	—	—	1.72	—	—	—
	91	335	—	35.1	—	—	10.5	—	—	—
	Aragonite	—	34.6	—	0.791	0.578	—	2.29	0.578	1.61
	Gypsum	—	22.9	—	0.048	0.018	—	0.21	0.0008	0.12
65-72	0	402	—	7.75	—	—	1.93	—	—	—
	75	1416	—	23.4	—	—	1.65	—	—	—
	80	710	—	31.5	—	—	4.44	—	—	—
	91	221	—	5.03	—	—	2.27	—	—	—
	Aragonite	—	37.5	—	0.742	0.619	—	1.98	0.016	1.20
	Gypsum	—	23.1	—	0.099	0.107	—	0.107	0.005	0.097
75-85	0	402	—	7.75	—	—	1.93	—	—	—
	75	1065	—	24.0	—	—	1.65	—	—	—
	80	902	—	8.18	—	—	0.907	—	—	—
	91	253	—	1.21	—	—	0.478	—	—	—
	Aragonite	—	35.8	—	0.687	0.610	—	1.92	0.017	1.28
	G+NaH	—	23.0	—	0.309	1.20	—	1.34	0.052	1.48
NaH	—	22.7	—	0.454	4.46	—	2.00	0.196	2.21	

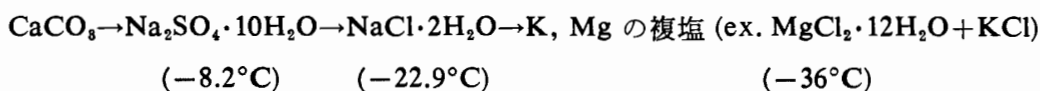
NaH: Na-bearing hemihydrate

3.2. Bonney 湖

Fryxell 湖より約 14 km 内陸側の Taylor 谷の Bonney 湖は、東西 2 つの湖が繋がったもので、両湖の化学組成はかなり異なっている。西湖は湖底に gypsum が、東湖には halite が析出している (山県ら, 1967; CRAIG *et al.*, 1974)。

松葉谷ら (1974) は、Bonney 湖の歴史的変遷を安定同位体を用いて、また TORII *et al.* (1975) は栄養塩類の鉛直分布から、西湖は内陸起源の氷河融水の湖盆への流入により形成され、その後、東湖が Ross 海側の氷河融水の流入で形成されたと考察した。この塩湖は海に開かれた Fryxell 湖と同様に Taylor 谷に存在するので、海水の寄与も大きいと思われる。

今回測定した Bonney 湖の Sr/Ca 比は海水のそれより若干低い値を示し、東西両湖ともその比にあまり大きな違いはみられなかった。しかし西湖の底層水は 1.69×10^{-2} と高い値を示すが、これは gypsum が湖底に沈積していることを裏づけている。次に Mg/Ca 比を東西両湖について求めてみると、底層水については東湖は西湖の約 3 倍高かった。一般に海水の凍結濃縮は水温を下げるにつれて、



が析出し、残留塩水は塩化カルシウム溶液 (-54°C) となる (THOMPSON and NELSON, 1956). 凍結濃縮で濃塩水が生じたならば $\text{Ca} \gg \text{Mg}$ 水になるはずであるが、西湖は $\text{Ca} < \text{Mg}$ で、東湖は $\text{Ca} \ll \text{Mg}$ である。海水の蒸発濃縮により塩沈殿がおこるならば、残留塩水は MgCl_2 や MgSO_4 に富み、 $\text{Ca} \ll \text{Mg}$ となるはずである。KEYS and WILLIAMS (1981) は SO_4/Cl 比や安定同位体組成から Bonney 湖への海水の寄与を報告した。また、JONES and FAURE (1978) は $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比から、湖水は Taylor Red Cone の水の影響を多く受けていることを示唆した。表 1 に示した両湖の成分濃度を比較してみると、西湖では 13 m 以下は Ca 濃度にほとんど差がみられないため、水の混合が比較的良好に行われているようである。しかし、東湖は下層にいくほど濃度が高くなって、成層をなしている。また、東湖のほうが全成分濃度が高い。そこで Bonney 湖の成因を松葉谷らのモデル (1974) をもとに、次のように考えた (図 4).

東西両湖の湖底で古い海水が、蒸発濃縮により halite が沈積し始める状態まで濃縮される (1). 西湖側の塩水に Taylor 氷河などからの融水が、内陸から比較的激しく流入し始め、塩水が拡散される。西湖から東湖に Na, Mg を多く含んだ水、いわゆる gypsum 沈殿後の上澄みが狭い水路を経て流れ込み、東湖に存在していた塩水上に成層をなしていく (2)-(3). 排水口のない Bonney 湖の水収支は、氷河融水とそれらの湖面からの蒸発、昇華によっていた

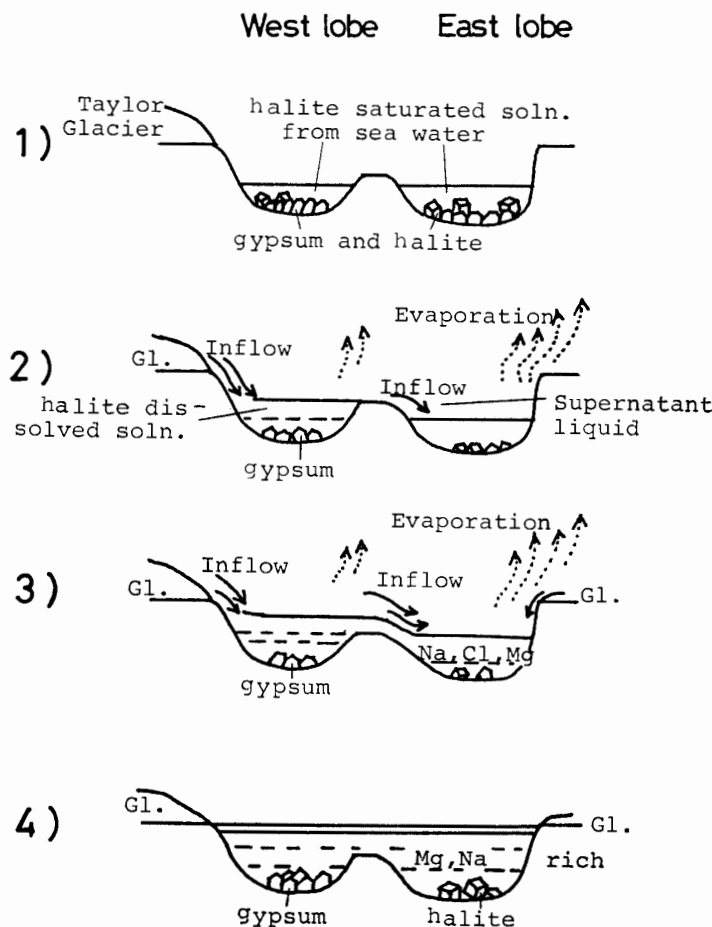


図 4 Bonney 湖の発展 (松葉谷らのモデル 1974 をもとに)

Fig. 4. Evolution of Lake Bonney (based on the model of MATSUBAYA et al., 1974).

め、氷河融水が西湖を経て東湖に行く間に蒸発が進み、西湖は底部で **gypsum** 飽和状態、東湖は底部で **halite** 飽和状態の湖水になる (4)。東西両湖を結ぶ水路の深さは約 11 m であるが、それを境に両湖の成分組成が異なるのは、このような理由によると考えられる。**halite** が沈殿し始める前の状態での蒸発濃縮海水の **Sr/Ca** 比は、蒸発濃縮実験から濃縮前の海水の比 1.93×10^{-2} より若干低い値 1.72×10^{-2} であるが、Bonney 西湖底の **Sr/Ca** 比 1.69×10^{-2} はこの値に近い。Dry Valley 地域の塩類析出堆積物の分布については、海水蒸発析出物が Bonney 湖から Fryxell 湖にわたり Taylor 谷を広く覆っていることが報告されている (NISHIYAMA, 1979)。これから Bonney 湖も Fryxell 湖と同じように、海水起因による塩類が起源として大きな因子となっていると考えられる。また **Sr/Ca** 比からみても、

Bonney 西湖 < Bonney 東湖 < Fryxell 湖

の順に海水の蒸発濃縮の割合の大きい塩水を源としていると考えられる。

3.3. Vanda 湖

Wright 谷中央の最底部に位置する Vanda 湖については、多くの研究者が塩湖成因を探る研究の対象としてきた。中井ら (1975) は $\delta^{18}\text{O}$ の測定の結果から、また RAGOTZKIE and FRIEDMAN (1965) は重水素の結果から、現在の Vanda 湖水は大部分陸水起源であると考察した。しかし湖周辺や湖底掘削コア中に存在する **evaporites** のイオウ同位体の研究 (NISHIYAMA and NAKAI, 1975; 中井ら, 1975) や、海洋性のホタテ貝や **diatoms** の化石が発見されている (TURNER, 1967) ことから、海水の寄与があったことも考えられている。Vanda 湖が Taylor 谷の Fryxell 湖や Bonney 湖と大きく違うのは、湖水の主要化学成分が **Ca** \gg **Mg** であり塩化カルシウム型の塩水であることである。このような水は海水の凍結濃縮で生成される最終塩水である (THOMPSON and NELSON, 1956)。

今回 Vanda 湖のストロンチウム濃度を測定したところ、**Sr/Ca** 比は上層から下層まで約 0.3×10^{-2} で、ほとんど一定していた。また、1976-1987 年の間に採水された試料でも、その比はほとんど変化していない。Bonney 湖や Fryxell 湖では、湖水下表層水と底層水での **Sr/Ca** 比および **Mg/Ca** 比の差が大きい。Fryxell 湖、Bonney 湖については古代海水残留物と氷河融水が静かに混合したと考えればこのような比の変化も考えられる。

濃縮した海水が希釈されたなら、塩水中の **Sr/Ca** 比は現海水と同じくらいか、かなり高くなければならない。しかし、Vanda 湖については **Sr/Ca** 比が海水の 1/5 ほどで、深度によらずほとんど一定なので、湖に流入する水が、湖水の **Sr/Ca** 比と同じような比を持たねばならない。Vanda 湖底の掘削コア中には、**gypsum** や **calcite** が析出している (中井ら, 1975)。表 3 に、南極産の **calcite** および **aragonite** 試料の **Sr/Ca** 比を示したが、**calcite** については $0.2-0.3 \times 10^{-2}$ の低い値を示している。同表に、蒸発鉱床地帯で産出した **gypsum** の **Sr/Ca** 比も合わせて示したが、これも低い値を示している。Vanda 湖には Onyx 川および周辺の氷河融水が流入する。中井ら (1975) や KEYS and WILLIAMS (1975) が示しているような海

表 3 南極産の calcite と aragonite の化学組成と蒸発鉱床地帯の石こうの化学組成
 Table 3. Chemical composition of calcite and aragonite from Antarctica and gypsum from evaporitic environments.

Sample No.	Insol. (%)	Fe (%)	Al (%)	Ca (%)	Sr (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Sr/Ca ($\times 10^2$)
Calcite									
1	9.87	1.48	1.35	30.94	0.0971	1.20	0.283	0.178	0.314
2	12.7	1.73	1.27	30.47	0.102	1.14	0.437	0.420	0.335
3	16.7	2.21	1.25	27.71	0.0559	1.32	0.423	0.478	0.202
4	16.3	2.62	1.60	26.09	0.0757	1.25	0.444	0.375	0.290
5	13.5	1.62	1.03	29.66	0.102	1.23	0.345	0.150	0.344
Aragonite									
1	—	1.32	0.434	35.32	0.525	0.201	0.140	0.317	1.49
2	—	1.80	0.524	34.32	0.586	0.275	0.148	0.270	1.71
Gypsum									
Canada	—	—	—	21.61	0.0117	—	—	—	0.0542
Kenya	1.18	0.043	—	21.64	0.0198	0.0084	—	—	0.0915
Morocco	0.14	0.066	—	21.62	0.137	0.0037	—	—	0.171

洋起源の evaporites が、氷河の融水や Onyx 河川水 (Sr/Ca 比; 0.21×10^{-2}) の流入により溶解し、Vanda 湖を形成したと考えられる。

3.4. Labyrinth 地帯の湖沼水

Wright 谷西端大陸氷床に接する露岩地帯 Labyrinth の湖沼水は、1977 年ごろから鳥居らによって調査が続けられてきた。これらの湖沼水のストロンチウム濃度は、ほとんどが検出限界以下であった。測定可能なものの Sr/Ca 比を求めたところ、最高でも 0.648×10^{-2} (L-44) で、ほとんどが $0.1-0.4 \times 10^{-2}$ の間にあった。図 5 に Labyrinth 地帯の湖沼水のカルシウム濃度とストロンチウム濃度の関係を示したが、これらの水には海水が関与しているとは考えにくい。これらの水は、氷河融水、岩石風化、風送塩起源の 3 つのグループに分かれるようである。高松ら (1987) はリチウムやホウ素含量の測定から、この地帯の湖沼水の塩類は風送塩によるものであろうことを示した。従って、この地帯の水は、氷河の融水が凹地に溜まったもの、周辺の evaporites を溶解したもの、氷河融水による玄武岩の風化、または氷河融水の蒸発濃縮や風送塩 (主成分として塩化ナトリウム) を起源としていると考えられる。

4. ま と め

今回測定した Dry Valley 地域の湖沼水のストロンチウム濃度は変化に富み、 $0-1630 \text{ mg/l}$ を示した。 Sr/Ca 比を求めてみると、各湖によって違いが現れたため、この比と他の成分とから次のような塩湖形成を考えた。

1) Fryxell 湖; Mg の濃度が Ca に比べて高いため、halite が析出するまで濃縮された古代濃縮海水を塩類起源としている。

2) Bonney 湖; $\text{Mg} \gg \text{Ca}$ を示す東西両湖とも Fryxell 湖のように halite 飽和近くまで蒸発濃縮された海水を源とし、さらに東湖は、西湖から氷河融水の流入により運ばれた、 Mg

文 献

- ANGINO, E. E., ARMITAGE, K. B. and TASH, J. C. (1962): Chemical stratification in Lake Fryxell, Victoria Land, Antarctica. *Science*, **138**, 34-35.
- CRAIG, H. (1966): Origin of the saline lakes in Victoria Land, Antarctica. *Trans. Am. Geophys. Union*, **47**, 112-113.
- CRAIG, J. R., FORTNER, R. D. and WEAND, B. L. (1974): Halite and hydrohalite from Lake Bonney, Taylor Valley, Antarctica. *Geology*, **2**, 389-390.
- FAURE, G. and JONES, L. M. (1974): The isotopic composition of strontium and the geological history of the basement rocks of Wright Valley, southern Victoria Land, Antarctica. *N.Z.J. Geol. Geophys.*, **17**, 611-627.
- JONES, L. M. and FAURE, G. (1978): A study of strontium isotopes in lakes and surficial deposits of the ice-free valleys, southern Victoria Land, Antarctica. *Chem. Geol.*, **22**, 107-120.
- KEYS, J. R. and WILLIAMS, K. (1981): Origin of the crystalline, cold desert salts in the McMurdo region, Antarctica. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**, 2299-2309.
- 楠 宏・鳥居鉄也・原田美道・山県 登・吉田栄夫編 (1973): ドンファン池と南極石. 南極, 共立出版, 306-308.
- 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化学成分. 地球化学討論会, **D3**.
- MATSUBAYA, O., SAKAI, H., TORII, T., BURTON, H. and KERRY, K. (1979): Antarctic saline lakes—stable isotopic ratios, chemical composition and evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**, 7-25.
- 森川日出貴・小坂丈子 (1975): バンダ湖周辺の二次生成鉱物の分布. 地球化学, **9**, 51-60.
- MORIKAWA, H., MINATO, I. and OSSAKA, J. (1975): Origin of magnesium and potassium ions in Lake Vanda, Antarctica. *Nature*, **254**, 583-584.
- 中井信之・和田皮秀樹・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.
- NISHIYAMA, T. (1979): Distribution and origin of evaporite minerals from Dry Valleys, Victoria Land. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **13**, 136-147.
- NISHIYAMA, T. and NAKAI, N. (1975): Sulphur isotope studies of evaporite minerals from Taylor Valley, Victoria Land, Antarctica. *DVDP Bull.*, **6**, 23.
- RAGOTZKIE, R. A. and FRIEDMAN, I. (1965): Low deuterium content of Lake Vanda, Antarctica. *Science*, **148**, 1226-1227.
- 高松信樹・中谷 周・鳥居鉄也 (1987): 南極 Victoria Land, Labyrinth 地域湖沼の塩起因—ホウ素, リチウムからの考察. 日本地球化学会年会講演要旨集, **3C01**.
- 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**, 227-238.
- TORII, T. and YAMAGATA, N. (1981): Limnological studies of saline lakes in Dry Valleys. *Dry Valley Drilling Project*, ed. by L. D. MCGINNIS. Washington, D.C., *Am. Geophys. Union*, 141-159 (*Antarct. Res. Ser.*, Vol. **33**).
- 鳥居鉄也・村田貞雄・吉田栄夫・小坂丈子・山県 登 (1966): 南極 Victoria Land の Dry Valley 調査報告 I. 南極 Victoria Land の Miers Valley に産する Evaporite について. 南極資料, **27**, 1-12.
- 鳥居鉄也・山県 登・長 連英 (1967): 南極 Victoria Land の Dry Valley 調査報告 II. 調査の概要および湖の水温. 南極資料, **28**, 1-14.
- TORII, T., YAMAGATA, N., NAKAYA, S., MURATA, S., HASHIMOTO, T., MATSUBAYA, O. and SAKAI, H. (1975): Geochemical and geophysical studies of Dry Valleys, Victoria Land in Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **4**, 5-29.
- TURNER, R. D. (1967): A new species of fossil *Chlamys* from Wright Valley, McMurdo Sound, Antarctica. *N.Z.J. Geol. Geophys.*, **10**, 446-455.
- 山県 登・鳥居鉄也・村田貞雄 (1967): 南極 Victoria Land の Dry Valley 調査報告 V. 湖水の化学成分. 南極資料, **28**, 53-75.

(1988年3月22日受付; 1988年5月2日改訂稿受理)