

## ドライバレー地域の塩湖の生成過程について

中谷 周\*・西村雅吉\*

## Geochemical Study of the Formation Process for the Saline Lakes in the Dry Valleys, South Victoria Land, Antarctica

Shyu NAKAYA\* and Masakichi NISHIMURA\*

**Abstract:** A simple model is proposed for the present chemical composition of the saline lakes in the Dry Valleys. A diluted water of sea salt whose compositional ratio was that of sea water was concentrated by evaporation to the present chlorinity.

During the concentration process, a part of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  replaced  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  of the sediment or weathering rock, and some part of  $\text{CaSO}_4$  deposited from the solution. All the reaction proceeded under an ionic mass-balance.

This simple idea can beautifully explain the origin of the chemical compositions of Lakes Vanda and Bonney. The salt concentration profiles in these saline lakes can be explained by the molecular diffusion (or ionic diffusion) of dissolved chemical substances from the bottom layer to the surface layer.

The vertical transport of salt from the bottom layer is given by a conventional Fickian equation, with a diffusion coefficient ( $D$ );

$$\partial C / \partial t = D (\partial^2 C / \partial z^2) \quad (1)$$

where  $C$  is the salt concentration,  $z$  is the vertical distance coordinate increasing upward from  $z=0$  at the bottom to  $z=h$  at the top of the saline layer, and  $t$  is time.

For eq. (1), the initial and boundary conditions are

$$\text{at } t=0; C=C_0 \text{ in } 0 < z < h \quad (2)$$

$$\text{at } t>0; C=C_h \text{ at } z=h \quad (3)$$

$$\text{and } \partial C / \partial z = 0 \text{ at } z=0 \quad (4)$$

The solution of (1), obtained by the Laplace transformation with the boundary conditions (2)–(4) is

$$C = C_0 + (C_h - C_0) \phi_1 \quad (5)$$

where  $\phi_1$  is a function of time ( $t$ ), height ( $z$ ), and diffusion coefficient ( $D$ ), its complete form being

$$\phi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[ \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h-z}{2(Dt)^{1/2}} + \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h+z}{2(Dt)^{1/2}} \right] \quad (5a)$$

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

The value of  $t$  of these saline lakes in the Dry Valleys is estimated by trial and error computation using eq. (5) and (5a). The age of stratification estimated for the salt diffusion from the bottom layers ranges from 1,000 to 1,250 years.

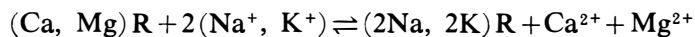
**要旨：**ドライバレー地域に点在する3つの塩湖、バンダ、ポニー、フリクセルの各湖について、底層にみられる高塩分濃度水の生成過程および塩成層生成年代について考察した。

高塩分濃度水は、海水組成を有するうすい水、あるいは海塩を起原水として、長年月の蒸発、濃縮により現在の底層水濃度まで濃縮された。その過程において、岩石、堆積物等とのイオン交換反応がおこり、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  は溶液から失われ、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  は溶液へ与えられ、 $\text{Ca}^{2+}$  の一部は  $\text{CaSO}_4$  として沈積したことで説明できる。

底層水の濃度傾斜については、形成期の塩湖はきわめて小さな氷河湖であった。その氷河湖へ大きな気候変動があり、周辺氷河融水が流入し、底層の高塩濃度水中の化学成分は底層から上層へ分子拡散、またはイオン拡散により拡散し、現在のような鉛直分布となった。この考えに基づいて、Fick の式、塩の拡散係数、実測塩濃度を用いて計算、その結果、1,000~1,250 年前に気候変動があったと考えられる。

著者らは、ドライバレー地域の塩湖の生成過程について考察を試みた。その結果、次のような作業仮説があてはまることをみつけ、例としてバンダ湖について述べる。

- 1) 海水組成を有するうすい水、あるいは海塩を出発物質とする。
- 2) 長年月の蒸発、濃縮によって少なくとも  $[\text{Cl}] = 2.288 \text{ M}$  まで濃縮した。
- 3) 濃縮過程において岩石、堆積物等との間に次のイオン交換反応が行われ



その平衡の結果、 $l_l$  について  $\text{Na} \ 1.667 \text{ M}$ 、 $\text{K} \ 0.0273 \text{ M}$  が溶液から失われ、一方、 $\text{Ca}$  の  $0.730 \text{ M}$ 、 $\text{Mg}$  の  $0.117 \text{ M}$  が岩石、堆積物等から溶液へ与えられた。

4)  $l_l$  について  $0.111 \text{ M}$  の  $\text{CaSO}_4$  が沈積した。表1は以上のような4つの過程によって、高塩濃度の底層水が形成されたことを示す。このような塩湖の底層水の組成の成因は、他のポニー湖、東湖、西湖についても説明できる。しかし、フリクセル湖については濃縮がまだ進んでいないため説明できない。

底層水の濃度傾斜については、次のような考察を行った。形成期のバンダ湖はきわめて小さな氷河湖であったと考えられ、その後、大きな気候変動があり、氷河湖へ周辺氷河融水が流入した。その結果、底層の高塩濃度水中の化学成分は底層から上層へ分子拡散（またはイオン拡散）により拡散し、現在のような鉛直分布になった。以上の考えに基づいて、拡散により、現在のような鉛直分布を示すに要した年数を以下の計算法により計算した。

表 1 バンダ湖の計算により求めた底層水の化学組成  
 Table 1. Chemical composition of bottom water in Lake Vanda.

	Process				Calculated	Present
	I	II	III	IV		
Na	0.480	1.961	-1.667		0.294	0.294
K	0.0105	0.0429	-0.0273		0.0156	0.0156
Ca	0.0105	0.0429	+0.730	-0.111	0.662	0.668
Mg	0.0545	0.223	+0.117		0.340	0.340
SO <sub>4</sub>	0.0289	0.118		-0.111	0.007	0.007
Cl+Br	0.560	2.288			2.288	2.288

水平方向では濃度傾斜がなく、底層からの塩の供給が分子拡散、またはイオン拡散のみによるとすると、塩の鉛直輸送は、Fick の式により、次のように表される。

$$\partial C / \partial t = D(\partial^2 C / \partial z^2) \quad (1)$$

$D$ : 拡散係数,  $C$ : 塩濃度,  $z$ : 高塩分濃度層  $h$  中の深さ (上方へ正), (1) 式の境界条件は,

$$t=0 \text{ で } C=C_0 \quad (0 < z < h) \quad (2)$$

$$t > 0 \text{ で } C=C_h(z=h) \quad (3)$$

$$z=0 \text{ で } \partial C / \partial z = 0 \quad (4)$$

となり、(1) 式の解は、境界条件 (2)~(4) を用い Laplace 変換により、

$$C = C_0 + (C_h - C_0) \phi_1 \quad (5)$$

となる。 $\phi_1$  は  $t, z, D$  の関数であり、次のように書ける。

$$\phi_1 = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left( \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h-z}{2(Dt)^{1/2}} + \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h+z}{2(Dt)^{1/2}} \right) \quad (5a)$$

上記の式を用い、分子拡散係数  $D$  を  $D=0.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  としてバンダ湖の濃度分布に最も適合する  $t$  を求めると、1,000~1,250 年の年数が得られる。このような計算法をフリクセル湖、ポニー湖、東西両湖についても行い、表 2 に示す結果を得た。

この結果、1,000~1,250 年前に気候変動があったと考えられる。

本論文は、現在 Geochim. Cosmochim. Acta に投稿中である。

表 2 塩の拡散より求めた成層年令

Table 2. Age of stratification estimated from the idea of the salt diffusion.

Lake	Salt diffusion coefficient, D ( $10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ )	Age of stratification (years)
Lake Vanda	0.5	1600-2000
	0.8	1000-1250
	1.0	800-1000
Lake Bonney east lobe	0.5	2000
	0.8	1250
	1.0	1000
Lake Bonney west lobe	0.5	1600-2000
	0.8	1000-1250
	1.0	800-1000
Lake Fryxell	0.5	1600-2000
	0.8	1000-1250
	1.0	800-1000