



Title	極域厳寒期における海面凍結過程 II : 生長しつつある海氷から流下するブラインの塩分量とその流量の測定
Author(s)	若土, 正暁; WAKATSUCHI, Masaaki; 小野, 延雄 他
Citation	低温科学. 物理篇, 39, 167-174
Issue Date	1981-03-18
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18426">https://hdl.handle.net/2115/18426</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	39_p167-174.pdf



## 極域厳寒期における海面凍結過程 II<sup>\*,\*\*</sup>

—— 生長しつつある海氷から流下する  
ブラインの塩分量とその流量の測定 ——

若土正暁・小野延雄

(低温科学研究所)

(昭和55年10月受理)

### I. はじめに

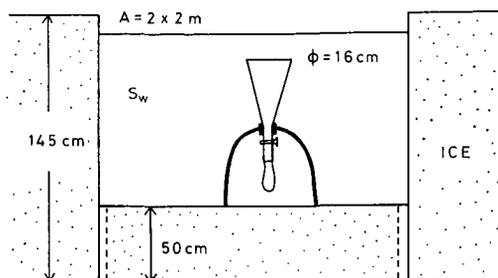
極域厳寒期における海面過程は、急激な海氷生成・生長によって特徴づけられる。そして海氷が生長していく過程に、ブライン(高塩分水)が排出されることはよく知られている。このブラインは高密度なため、海水下に顕著な塩対流をひきおこす<sup>1-5)</sup>。

著者のひとり若土は、一連の実験<sup>5,6)</sup>において、海氷からの塩排出は生長の初期過程に著しく多いこと、排出されたブラインは、糸状になって、あるときは周囲の水とほとんど拡散混合せずに流下していき、またあるときは、細いのが束になって対流セルを作りながら、やがては周囲の水と混合していくことを、海氷の生長速度を変化させることによって示した。しかしながら、海水下の海水の塩分量に比べて、どれだけ高塩分のブラインが、どれだけ量排出されるのかといった定量的な観測は、今までになされたことがない。

1980年3月、アラスカの北極海沿岸の海氷上で行なった現場実験観測<sup>7,8)</sup>で、生長しつつある海氷の下を流下するブラインの塩分量とその流量を測定した。

### II. 観測方法

アラスカ最北端バロー沖の定着氷(厚さ約1.5 m)上に、約2×2 mのプールを2つ造り、そこでの海水が凍結していく過程を調べた。これらのプールは、第1図に示すように、完全に貫通はさせず、底に装置が置けるように、下約50 cmの厚さの氷は残した。そして底面数カ所にコアドリルで穴を開け、下の海水を導き入れた。またこれらのプールのうち1つは、海面からの蒸発を抑えるためポリエチレンシートで表面を覆



第1図 プールの模式図(鉛直断面)

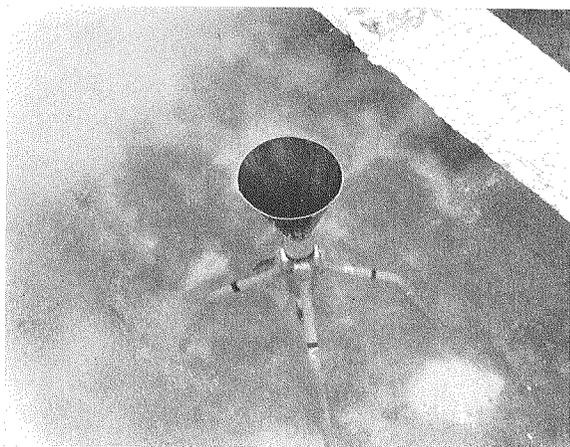
\* 北海道大学低温科学研究所業績 第2288号

\*\* 北海道大学低温科学研究所 流氷研究施設研究報告 第93号

った。流下するブラインを採取する装置は、直径約 16 cm のステンレス製ロートを使った。ほとんど拡散せずに流下してきたブラインは、このロートの下につけた袋に、できるだけそのまま入り込むように工夫した。操作手順は次のようにした。海面が凍結を開始する前に、袋の中の空気は完全に抜き、そのまま静かに水中に沈め、海水がロートに半分位入ったところで、ロートと袋をつなぐ管のところに付けた栓をしめた。その後装置全体を水中に沈め(第2図)、プールの底に置いた。従って、この時ロートの中は、プール全体の海水(塩分量  $S_w$ )と同じ水で満されている。そして海面が結氷し始める直前に、栓を開け、流下するブラインが袋の中に入れるようにした。

観測は午後から開始し、原則として翌朝回収するようにした。この時期の海氷の生長量は、一晩あたり高々 10 cm なので、ロートの口が海面下約 10 cm のところにくるように、ロートにつけた脚で調節した。観測終了とともに、ロートに上ブタをし、栓をしめてから装置全体を引き上げた(第3図)。得られた装置内の海水は、袋の部分(塩分量  $S'_F$ , 体積  $V'_F$ )、栓より下の管の部分( $S'_K$ ,  $V'_K$ )、ロートの部分( $S'_R$ ,  $V'_R$ )の3つの部分に分けて、別々のポリ瓶に入れて実験室に持ち帰った。測

定したものは、 $S_w$ ,  $S'_F$ ,  $S'_K$ ,  $S'_R$ ,  $V'_F$ ,  $V'_K$ ,  $V'_R$  の他に、装置を引き上げる前のプール全体の海水の塩分量( $S'_w$ )である。またプールに出来た海氷の塩分量( $S_i$ )も同時に測定した。このための試料と、薄片製作用の試料とを採り出した後で、プール内に残った海氷はすべて、その都度取り除き、次の観測に備えて毎回更新した。



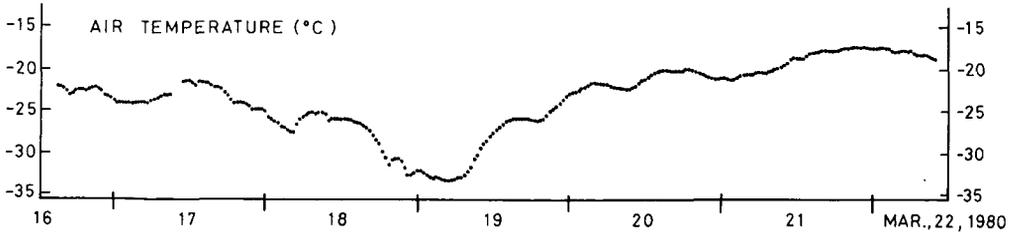
第2図 装置をプールに沈めたところ



第3図 ブライン採取装置を引き上げたところ

III. 観測結果

この観測期間中の気温は、第4図に示ように、最低  $-33^{\circ}\text{C}$  から最高  $-18^{\circ}\text{C}$  まで変化したので、短期間ではあったが、生長速度のいろいろな場合について調べることが出来た。観測結果については、第1表にまとめてある。



第4図 観測期間中の気温変化

第1表 観測結果

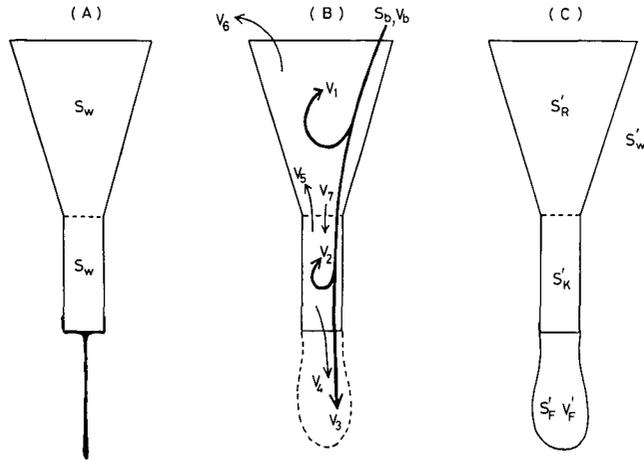
No.	観測期間	プール	氷厚 (cm)	積雪 (cm)	要した 時間 (hr)	生長 速度 (cm/hr)	$S_w$ (%)	$S'_w$ (%)	$S'_F$ (%)	$S'_K$ (%)	$S'_R$ (%)	$S'_I$ (%)	$S_I$ (%)	$V'_F$ (cc)
17A	3月16~17日	A	4.5	1	18.25	0.247	32.57	32.97	41.86	34.57	33.67	25.14	26.22	55
17B-1	"	B-1	5.5	2	17.83	0.308	32.63	33.01	38.91	34.18	33.60	26.21	25.76	57
18A	3月17~18日	A	7.5	0	18.17	0.413	32.70	33.17	37.11	34.49	33.66	27.58	21.23	83
18B-1	"	B-1	7.5	0	16.50	0.455	32.79	33.19	36.94	34.45	33.60	28.01	21.14	86
18B-2	"	B-2	8	0	17.67	0.453	32.79	33.21	36.94	34.51	33.60	28.11	21.43	90
19A	3月18~19日	A	7.7	0	17	0.453	32.97	33.47	37.79	34.81	33.84	27.66	22.37	89
19B-1	"	B-1	8.7	0	17.83	0.487	33.02	33.47	37.34	34.67	33.68	28.35	23.11	98
19B-2	"	B-2	8.2	0	17.67	0.464	33.02	33.47	37.74	34.58	33.78	28.03	22.67	96
20B-2	3月19~20日	B-2	4.5	7	17.08	0.263	33.24	33.64	38.75	34.72	34.36	24.90	24.30	58
21A	3月19~21日	A	7.5	10.5	41.25	0.182	33.20	34.03	43.99	38.18	35.82	23.75	18.91	103
21B-1	"	B-1	5.5+6	9	41.50	—	33.24	33.80	39.69	39.98	36.68	23.54	16.93	81
22A	3月21~22日	A	4	30	17.58	0.228	33.51	33.91	42.15	35.74	34.63	24.70	25.57	50
22B-2	"	B-2	4.5+4.5	20	16.58	—	33.62	34.0	40.27	37.16	34.62	25.47	25.30	65

(注) プール A; 蒸発抑制, プール B; 自然状態, 氷厚の+は雪氷

得られた  $S'_F$  は,  $S_w$  が  $32.5\sim 33.5\%$  に対して, 約  $37\sim 44\%$  で, また  $V'_F$  も, 約  $50\sim 100\text{cc}$  で, いずれも海水の生長速度に依存していることがうかがわれる。

IV. 考 察

海水から排出されたブラインのすべてが, 途中で囲りの海水に全く拡散せずに袋に入ったものとすれば,  $S'_F$ ,  $V'_F$  がまさに, 真のブラインの塩分量 ( $S_b$ ), 体積 ( $V_b$ ) ということになる。ところが第1表からわかるように,  $S'_R$  が  $S_w$  に比べて増えていることから, ロート内で拡散混合が起こっていることがわかる。これらを考慮に入れて, 真の  $S_b$ ,  $V_b$  を求めるために, 次のように現象をモデル化して見積ってみた。即ち, 海水が生長しつつある過程に於いて, 装置内では次のような水の出入り (第5図(B)) があったものとする。



第5図 モデルの図式化

(A) 結氷前 (観測開始時) (B) 途中 (海氷が生長しつつある過程) (C) 結氷後 (観測終了時)

$$V_b = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1)$$

$$V'_F = V_3 + V_4 \quad (2)$$

$$V'_F + V_6 = V_b \quad (3)$$

$$V_4 + V_5 = V_2 + V_7 \quad (4)$$

またそれぞれの水の塩分量は、次のようにおいた。

$$V_b, V_1, V_2, V_3; S_b$$

$$V'_F; S'_F$$

$$V_4, V_5; S_K$$

$$V_6, V_7; S_R$$

以上のことから、観測開始時から終了時までには、装置の各部分で次のような質量と塩の収支が成り立つ。

質量収支

$$\rho_K V_4 + \rho_b V_3 = \rho'_F V'_F \quad (5)$$

$$\rho_w V_K + \rho_b V_2 + \rho_R V_7 - \rho_K V_4 - \rho_K V_5 = \rho'_K V'_K \quad (6)$$

$$\rho_w V_R + \rho_b V_1 + \rho_K V_5 - \rho_R V_7 - \rho_R V_6 = \rho'_R V'_R \quad (7)$$

塩収支

$$\rho_K S_K V_4 + \rho_b S_b V_3 = \rho'_F S'_F V'_F \quad (8)$$

$$\rho_w S_w V_K + \rho_b S_b V_2 + \rho_R S_R V_7 - \rho_K S_K V_4 - \rho_K S_K V_5 = \rho'_K S'_K V'_K \quad (9)$$

$$\rho_w S_w V_R + \rho_b S_b V_1 + \rho_K S_K V_5 - \rho_R S_R V_7 - \rho_R S_R V_6 = \rho'_R S'_R V'_R \quad (10)$$

ここで  $\rho$  はそれぞれの密度である。また  $V_K = 35 \text{ cc}$ ,  $V_R = 2,000 \text{ cc}$  である。方程式 (1)~(10) を用いれば、 $S_b$  に関する次のような二次式が導き出される。

$$\begin{aligned}
 & [\rho_K^2 \{a(k'-w) - b(f-k)\} V_K + \rho'_F \rho_K (ck - ar - df) V'_F] S_b^2 \\
 & - [2\rho_K k \{a(k'-w) - b(f-k)\} V_K \\
 & \quad + (\rho_R afk - \rho_K afr - \rho'_F akr + \rho'_F ck^2 - \rho_K df^2) V'_F] S_b \\
 & + k^2 \{a(k'-w) - b(f-k)\} V_K + fk(ck - ar - df) V'_F = 0
 \end{aligned} \tag{11}$$

ただし

$$\begin{cases}
 \rho'_F - \rho_K = a \\
 \rho'_K - \rho_w = b \\
 \rho'_F - \rho_R = c \\
 \rho_K - \rho_R = d \\
 \\
 \rho_K S_K = k \\
 \rho_R S_R = r \\
 \rho_w S_w = w \\
 \rho'_K S'_K = k' \\
 \rho'_F S'_F = f
 \end{cases}$$

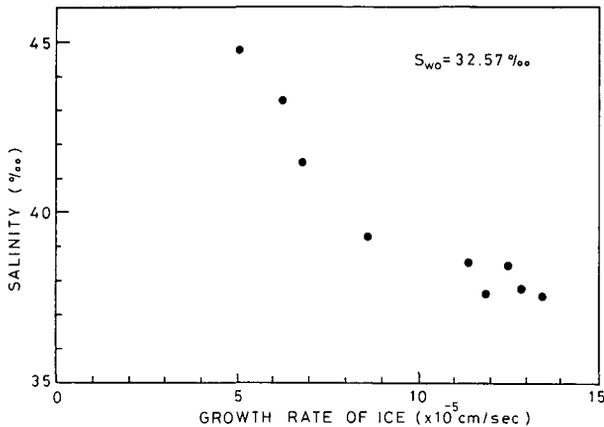
(11) 式から  $S_b$  を求めるにあたって、

$$\rho = f(S) \tag{12}$$

であるから、結局  $S_R, S_K$  の2つが未知数として残ることになる。そこで、途中ロート内を出入りするこれらの水の塩分量は、次のような最初と最後の平均値であったと仮定する。

$$\begin{cases}
 S_R = (S_w + S'_R)/2 \\
 S_K = (S_w + S'_K)/2
 \end{cases} \tag{13}$$

そこで(12), (13)を用いて(11)から  $S_b$  を導き出し、生長速度との関係を示したのが第6図である。



第6図 流下するブラインの塩分量の生長速度に対する関係

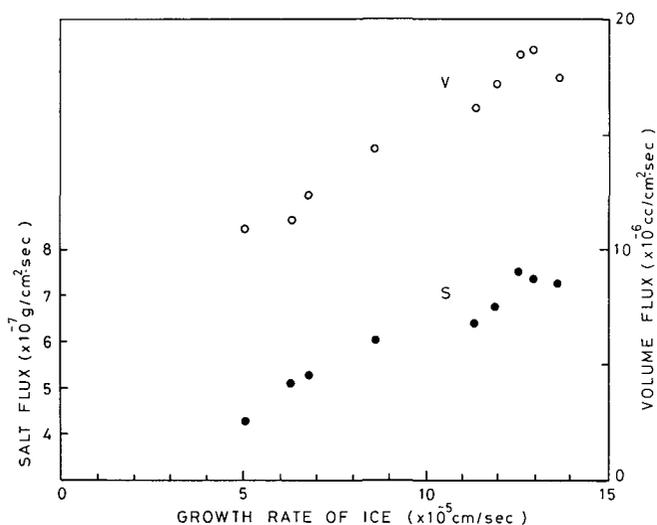
第1表でもわかるとうり、毎回観測のたびごとに母海水の塩分量 ( $S_w$ ) が少しずつ増加しているのので、第6図に示すブラインの塩分量 ( $S'_b$ ) は、次のように一番最初の日 (3月17日) の母海水塩分量 ( $S_{w0}$ ) に換算して求めた。

$$S'_b = S_b \cdot S_{w0} / S_w$$

母海水に比べて約5~12% 高塩分量のブラインが見積られたが、これらは  $S'_F$  に比べて約1~4% 高い。またこの図から明らかなように、生長速度が大きくなるにつれて、相対的に低塩分量のブラインが排出されていることがわかる。

次にブライン流量  $V_b$  も、(13)の仮定を用いてやれば、(1)~(10)の式から  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  が求まり、従って  $V_b$  が導き出される。

以上のように実測値を入れて求めた  $S_b$ ,  $V_b$  から、単位時間、単位断面積当りに海氷から排出される塩の量 (Salt Flux) とブライン流下量 (Volume Flux) とを見積り、生長速度との関係で示したのが第7図である。明らかなように生長速度が大きくなる程、排出される塩の量もブライン流下量も、ほぼ直線的に増加していることがわかる。



第7図 ブラインによる排出塩量 (●) と流下量 (○) の生長速度に対する関係

一般に、速く氷った場合の方がゆっくり氷った場合より、出来た海氷の塩分量は多いことはよく知られている。今回の観測では海水の塩分量 ( $S_i$ ) も実測したが、試料を採り出すとき、どうしてもブラインが一部落下してしまうため、誤差を含んでいるものと考えられる。そこで、観測終了時のプール全体の海水の塩分量 ( $S'_w$ ) とアイススタシーの仮定から海水の塩分量 ( $S_i$ ) を求めたのが第1表に示してある。これでも海水の塩分量は速く氷った時ほど (生長速度が大きいかほど) 高い。それは第6図、第7図からもわかるように、相対的に低塩分のブラインが多量に排出されたからで、逆にゆっくり氷って出来た海氷の塩分量は少ない。それは高塩分の濃いブラインが少しずつ出ているからだということの説明がつく。このことは水槽実験で得た定性的な結果とよく合っている<sup>6)</sup>。

おわりに現地での観測にあたって終始暖かい御協力をいただいた、アラスカ大学の J. F. Kelly 博士, R. Metzner 氏, T. Hall 氏, NARL の職員の方々に、厚くお礼申し上げます。また現場での観測に御協力いただいた河村俊行助手に感謝します。

この研究はアラスカ調査費によった。

## 文 献

- 1) Foster, T. D. 1968 Haline convection induced by the freezing of sea water. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1933-1938.
- 2) Foster, T. D. 1969 Experiments on haline convection induced by the freezing of sea water. *J. Geophys. Res.*, **74**, 6967-6974.
- 3) Foster, T. D. 1972 Haline convection in polynyas and leads. *J. Phys. Oceanogr.*, **2**, 462-469.
- 4) Farhadich, R. and Tankin, R. S. 1972 Interferometric study of freezing of sea water. *J. Geophys. Res.*, **77**, 1647-1657.
- 5) 若土正暁 1977 海水の凍結によって起る塩対流に関する実験. 低温科学, 物理篇, **35**, 249-258.
- 6) 若土正暁 1974 海水生氷と海水からのブラインの排出に関する実験. 低温科学, 物理篇, **32**, 195-205.
- 7) 小野延雄・若土正暁・河村俊行 1980 極域厳寒期における海面凍結過程. I. 結氷初期の蒸発の役割と塩のふるまい. 低温科学, 物理篇, **39**, 159-166.
- 8) 河村俊行・小野延雄 1980 極域厳寒期における海面凍結過程. III. 新生海水の結晶軸の測定. 低温科学, 物理篇, **39**, 175-180.

## Summary

It is well known that brine is rejected by a growing sea ice. Salinity of the brine is higher than that of underlying seawater. The resulting unstable condition gives rise to a haline convection. One of the authors (Wakatsuchi, 1977) showed by a series of experiments that the brine rejected into water took the form of long vertical filaments and their typical horizontal spacings were 0.05 and 0.10 cm at a higher and a lower growth rate of sea ice, respectively. He also showed that the haline convection produced by the filamentous brine varied in behavior with the growth rate.

Measurements of salinities and volumes of the rejected brine were made by use of brine samplers in two artificial small pools in fast ice (Fig. 1). A sampler is made of a funnel, a sack and a pipe connecting the two as shown in Fig. 3. Air in the sack was fully released immediately before the surface water began to freeze. The filamentous brine which streamed into the funnel was caught in the sack as much as possible. Salinities and volumes of seawater measured in the present experiment are  $S_w, S'_w, S'_F, S'_K, S'_R$  and  $V_K, V_R, V'_F$  respectively. The salinities of the water caught in the sack,  $S'_F$ , were higher than  $S_w$  by 5 to 12‰. If all brine directly entered into the sack without any diffusion on the way,  $S'_F$  and  $V'_F$  should correspond to  $S_b$  and  $V_b$ , respectively. However,  $S'_R$  were always higher than  $S_w$  as shown in Table 1. In consideration of amounts of brine which diffused in the funnel and the pipe and water which overflowed from the sampler, therefore, the real salinity,  $S_b$ , and volume,  $V_b$ , of brine were estimated by use of model as shown in Fig. 5-B. Equations (5) through (10) show mass and salt budgets in each part of the sampler during the time from the beginning to the end of the experiment. Two unknown values,  $S_K$  and  $S_R$ , are contained in quadratic equation (11) for  $S_b$  obtained from their budgets. Therefore,  $S_b$  and  $V_b$  were obtained by use of the assumptions as shown in equation (13). The salinity of the brine,  $S_b$ , are higher

than  $S'_F$  by 1 to 3‰ and also decrease with increasing growth rate of sea ice as shown in Fig. 6. Salt fluxes and volume fluxes estimated from  $S_b$  and  $V_b$  are shown in Fig. 7, in which both them increase with increasing growth rate. Sea ice formed at higher growth rates has a relatively high salinity as shown in Table 1. In spite of these results, it is clear from Figs. 6 and 7 that relatively much brine with a lower salinity was rejected with increasing growth rate of ice.