



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	海水の透水性 I : NaCl氷の透水係数の測定
Author(s)	斎藤, 隆; SAITO, Takashi; 小野, 延雄 他
Citation	低温科学. 物理篇, 37, 55-62
Issue Date	1979-03-26
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18369">https://hdl.handle.net/2115/18369</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	37_p55-62.pdf



## 海 氷 の 透 水 性 I\*

— NaCl 氷の透水係数の測定 —

齋 藤 隆

(北海道大学大学院 理学研究科)

小 野 延 雄

(低温科学研究所)

(昭和53年10月受理)

### I. はじめに

海氷はその内部にブライン(濃縮海水)を閉じ込めているために、非常に多孔質で、透水性も良好である。しかし、海氷の透水性についての測定例は極めて少ない。Pounder と Little<sup>1)</sup> は北極の多年氷にコアドリルで穴をあけ、その水位の時間変化から周辺の氷の透水係数の鉛直分布を求めた。また Langleben<sup>2)</sup> は同じ場所の氷をコアドリル(直径7.8 cm)で切り出して、通気度を測定した。しかし、氷層から海氷試料を切り出すとブラインが流失し、海氷の透水性質が変化するという問題を生じる。このために、本研究では人工海氷(NaCl 氷)の作成容器そのものを変水位透水計として、生成したばかりの NaCl 氷の鉛直方向の透水係数を着色した灯油を通して測定した。

### II. 測定装置及び方法

断面積  $A \text{ cm}^2$ 、長さ  $L \text{ cm}$  の透水性多孔体試料に流体を流すとき、試料の両端にかかる水頭差を  $H \text{ cm}$  とすると、その流量  $Q \text{ cm}^3/\text{s}$  は動水勾配  $H/L$  に比例して

$$Q = K(H/L) A \quad (1)$$

となる。この式はダルシー則と呼ばれ、比例定数  $K \text{ cm/s}$  は透水係数といわれる。今、変水位法により、この流量  $Q$  を断面積  $a \text{ cm}^2$  の降水管内の液面低下  $dH/dt \text{ cm/s}$  として測ると

$$Q = -(dH/dt) a \quad (2)$$

であり、(1)式に代入して

$$K dt = -(aL/A)(dH/H) \quad (3)$$

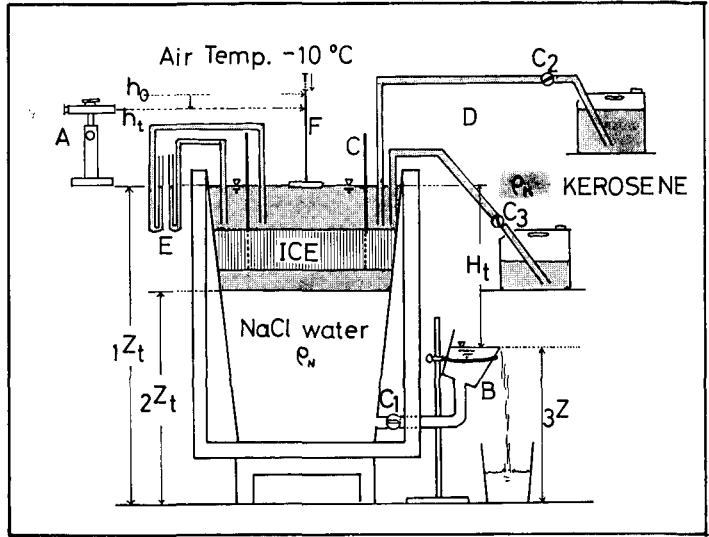
と書くことができる。時刻  $t_1 \rightarrow t_2$  の間に水頭が  $H_1 \rightarrow H_2$  に低下したとして、(3)式の両辺を積分すると

$$K = [aL/(t_2 - t_1) A] \ln(H_1/H_2) \quad (4)$$

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第1965号

となる。従って、2つの時刻  $t_1, t_2$  における水頭  $H_1, H_2$  を測定すれば、透水係数  $K$  を求めることができる。

蓋のない断熱箱の中に収めた口径 50 cm、底の直径 42 cm、深さ 85 cm のポリエチレン容器に、NaCl 水溶液を約 110 l 入れて、室温  $-20^{\circ}\text{C}$  の低温実験室に置き、上から冷やして厚さ約 10 cm の NaCl 氷を生成させた。容器の外側の断熱箱内の



第1図 測定装置の模式図

空間は、温度調節ヒーターで容器内水溶液の結氷温度に保ち、容器の壁面からの氷の生長を防いだ。また、氷厚の増加につれて容器内水圧が高まるのを防ぐために、圧力抜きのパイプをつけた。氷温の鉛直分布は熱電対で測定した。表面に薄い氷が張ったところで上方に据えつけた扇風機で風を送り、氷の生長を促した。氷層から氷試料を切り出すとブラインが流れ落ちて空気が入り、透水性に変化をもたらすおそれがあるので、生成したての氷をそのまま用いるように工夫した。測定装置を第1図に示した。先ず、NaCl 氷の表面に直径 30 cm のステンレス円筒 C を少し暖めてのせて凍着させる。この円筒の内と外とにおよそ  $-9 \sim -10^{\circ}\text{C}$  の着色灯油を入れて排水栓  $C_1$  をあける。灯油は試料内部に浸透し、ブライン排水路内のブラインを押し出して、やがて試料底面一面に貯る。また、U 字管 E を見ながら円筒内外の油位が常に等しくなるように、外側の油位を注入栓  $C_2$  と排水栓  $C_3$  を開閉して調節した。従って、図中の点線で示した円筒と同断面積の円柱氷層を通る油量によって、円筒内の油位の低下がもたらされると考えることができ、この円柱の周囲の氷はガードリングの役目を果たしているとみなすことができる。また、氷層を透過した灯油により押し下げられた NaCl 水はブライン溜 B から溢れ出る。第1図を見て分るように、時刻  $t=t$  のときの水頭  $H_t$  は灯油と NaCl 水の両方の水頭を含んでいるので、NaCl 水の水頭を灯油換算水頭に直して、灯油の水頭とした。この水頭  $H_t$  を次のようにして求めた。時刻  $t=0$  の時の床から測った油位、灯油と NaCl 水の界面、ブライン溜の水位をそれぞれ  ${}_1Z_0, {}_2Z_0, {}_3Z$  で表し ( ${}_3Z$  は各測定の間は一定である)、灯油と NaCl 水の密度をそれぞれ  $\rho_K, \rho_N$  とするとき、水頭  $H_t$  は次式で表わされる。

$$H_t = {}_1Z_t - {}_2Z_t + [{}_2Z_t - {}_3Z] \cdot \rho_N / \rho_K \tag{5}$$

油位の低下  ${}_1Z_0 \rightarrow {}_1Z_t$  はフロートの低下  $h_0 \rightarrow h_t$  と同じであるから

$${}_1Z_t = {}_1Z_0 - (h_0 - h_t)$$

である。また、時刻  $0 \rightarrow t$  の界面低下量は、容器断面積の深さ変化を考慮した補正曲線を用いて、ブライン溜から溢れ出た量  $\Delta V$  をもとに次式によって算出した。

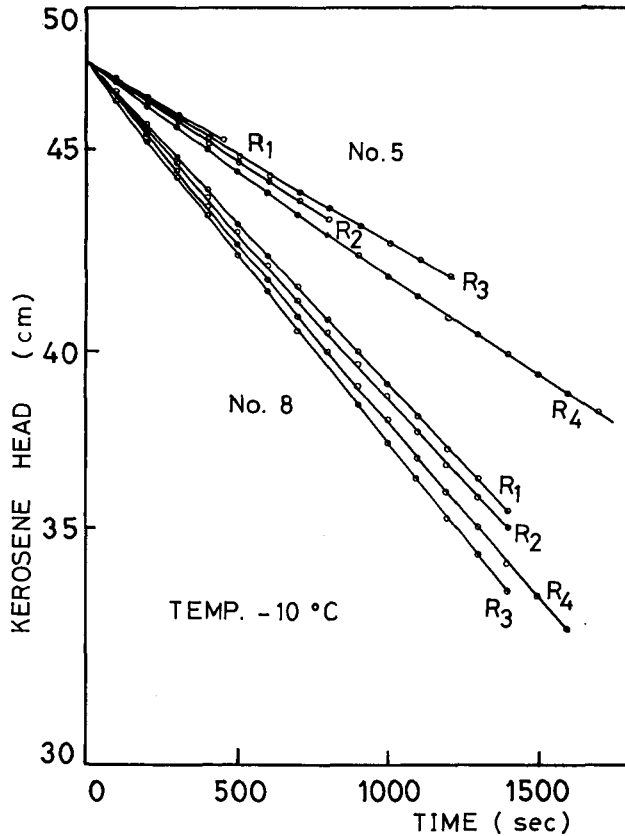
$${}_2Z_t = {}_2Z_0 - m\Delta V$$

但し、補正係数  $m$  は深さの関数である。このようにして、フロートの低下、流失量  $\Delta V$  を各時刻で測定することにより、(5)式を用いて各時刻の灯油水頭  $H_t$  を求めることができた。2つの時刻  $t=t_1, t_2$  の灯油水頭  $H_1, H_2$  から、(4)式を用いて、灯油透水係数  $K$  を計算した。円筒内の油位低下、即ちフロート F の低下を垂直移動望遠鏡 A によって  $\pm 0.05 \text{ mm}$  の誤差で読み取り、NaCl 水の流出量  $\Delta V$  は  $\pm 20 \text{ cc}$  の誤差すなわち界面低下量にして  $\pm 0.1 \text{ mm}$  の誤差内で測っている。

### III. 測定結果

第2図は試料5と8の測定例を示し、現象がどの程度ダルシー則を満足しているか、及び透水係数の値の再現性がどの位あるかを示したものである。図の横軸は時間、縦軸は灯油水頭を対数目盛でとっているから、両者の関係が直線であれば(4)式によってダルシー則を満足する。図から分るように、測定結果は全てほぼ直線とみなすことができ、透水係数を一定値として得ることができた。また同一試料で繰り返し測定を行なうとその都度透水係数の値に若干の相違が見られるが、異なる試料間の差に較べれば小さいことも分った。従って、各試料については2~3回の繰り返し測定を行なって、得られた透水係数の最小と最大の範囲を示すことにした。

異なる透水的構造をもった氷試料を得るために、凍らせる前の NaCl 水の濃度  $M$  (mol/l) を変えた。氷試料に着色した灯油を透過させ、円筒の周に沿って切った円柱試料から灯油を流出させないようにすばやく反転して取り出してその底面を観察した。第3図は  $M$  が  $0.6 \text{ mol/l}$  の試料底面の写真である。写真の中で斑点状に見えるのは、透過した着色灯油が溜っているブ

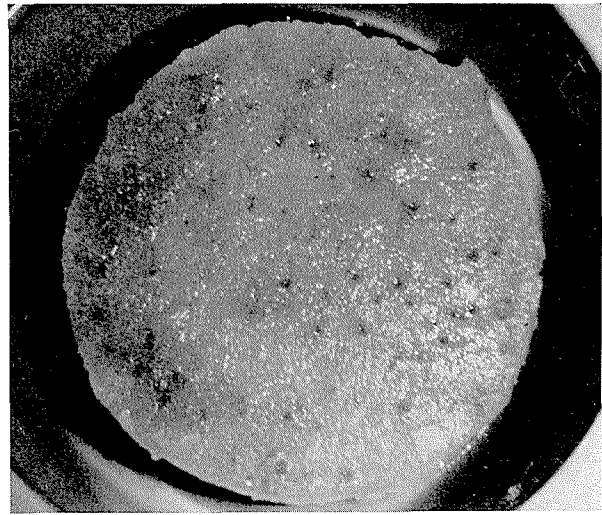


第2図 灯油水頭(対数目盛)の時間変化

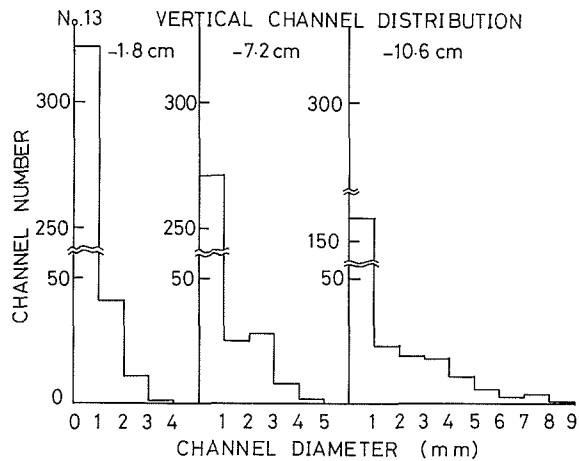
ライン排出孔である。直径 30 cm の試料底面に渡って、ほぼ円形の断面をもつ種々の直径の排出孔がほぼ均一に分布しており、直径 1 mm 以上の排出孔が約 100 本存在していた。その他の試料についてもほぼ同様の形状を示していた。また、これらの排出孔の直径が氷層の各位置で異なっているので第 4 図に  $M=0.45$  の試料について、各断面におけるブライン排水路の管径と数のヒストグラムを示した。次に  $M$  の異なる氷試料について、表面から 1.5~2 cm の断面と 7.4 cm の断面に渡る様々な管径  $2r_i$  をもった、ブライン排水路の総断面積を各ヒストグラムから求め第 5 図に示した。横軸には凍らせる前の NaCl 水の濃度  $M$  (mol/l) を、縦軸には排水路の管断面積総和  $\sum_i n_i \pi r_i^2 \text{cm}^2$  をとっている。この図から分かるように、 $M$  が増加すると  $\sum_i n_i \pi r_i^2$  も増加する。即ち、排水路がよく発達している。

このようにして、異なる透水路構造をもった氷試料の全層透水係数  $K_T$  の測定結果を第 1 表に載せた。 $L_T$  は全層の氷試料の厚さ

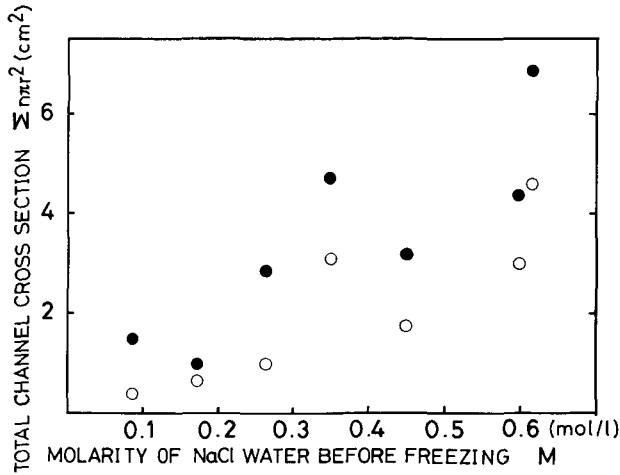
である。この表から明らかなように、 $M$  が増せば  $K_T$  は増加している。しかし、 $M$  がほぼ 0.2 mol/l 以下の時には、降油管 C 内の油位の低下は認められず  $K_T$  を求めることができなかった。しかし、生成した NaCl 氷の鉛直断面の薄片を調べると、全ての氷試料は、表面から 1.5~2 cm 位までとその下の層では結晶粒の大きさや形の点で大きく変っていた。表面付近の氷は大粒径の氷が水平にあり、下の層ではくさび形の氷が成長方向に一樣に整列していた。第 4 図の -1.8 cm のヒストグラムは下層の上部に当たっている。このため、氷を上下 2 層構造とみなして第 6 図に示す透水模型を考えた。表層の透水係数を  $K_s$ 、下層の透水係数を  $K_L$  とすると、 $K_T$  と次の関係が導かれる。



第 3 図 灯油を透過させた後の NaCl 氷の底面  
黒い斑点はブライン排水孔  
No. 17  $M$ ;  $\sim 0.6 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$



第 4 図 ブライン排水路の鉛直分布  
試料 13  $M=0.450$



第5図 ブライン排水路の管断面積総和と凍らせる前の NaCl 水の濃度  $M$  (mol/l) との関係  
 ○;  $-1.5 \sim -2$  cm    ●;  $-7.4$  cm

第1表 測定結果

Sample No.	$M$ (mol/l)	$L_T$ (cm)	$K_T$ (cm/sec)	$L_L$ (cm)	$K_L$ (cm/sec)	$L_S$ (cm/sec)	$K_S$ (cm/sec)
1	~0.60	9.6	$\sim 1.4 \times 10^{-3}$				
4	"	10.2	$2.7 \times 10^{-3}$ $\sim 3.3 \times 10^{-3}$				
5	"	11.4	$1.4 \times 10^{-3}$ $\sim 1.6 \times 10^{-3}$				
8	"	9.8	$2.1 \times 10^{-3}$ $\sim 2.4 \times 10^{-3}$				
10	0.616	9.8	$6.1 \times 10^{-4}$ $\sim 6.3 \times 10^{-4}$	7.8	$9.1 \times 10^{-3}$ $\sim 1.1 \times 10^{-2}$	2.0	$1.3 \times 10^{-4}$ $\sim 1.4 \times 10^{-4}$
11	0.349	9.8	$2.8 \times 10^{-5}$ $\sim 3.6 \times 10^{-5}$	7.8	$1.1 \times 10^{-2}$ $\sim 1.4 \times 10^{-2}$	2.0	$5.6 \times 10^{-6}$ $\sim 7.4 \times 10^{-6}$
13	0.450	10.6	$2.7 \times 10^{-4}$ $\sim 3.2 \times 10^{-4}$	8.8	$7.6 \times 10^{-3}$ $\sim 8.4 \times 10^{-2}$	1.8	$4.8 \times 10^{-5}$ $\sim 5.6 \times 10^{-5}$
14	0.172	10.1	—	8.6	$7.3 \times 10^{-4}$ $\sim 1.5 \times 10^{-3}$	1.5	—
15	0.263	9.7	$2.2 \times 10^{-5}$ $\sim 2.8 \times 10^{-5}$	8.2	$4.9 \times 10^{-3}$ $\sim 6.2 \times 10^{-3}$	1.5	$3.4 \times 10^{-6}$ $\sim 3.7 \times 10^{-6}$
16	0.086	10.1	—	8.4	$5.1 \times 10^{-5}$ $\sim 1.1 \times 10^{-4}$	1.7	—
17	0.598	10.0	$1.6 \times 10^{-3}$ $\sim 1.7 \times 10^{-3}$	8.0	$1.1 \times 10^{-2}$ $\sim 1.4 \times 10^{-2}$	2.0	$3.4 \times 10^{-4}$ $\sim 3.9 \times 10^{-4}$

$$L_T/K_T = L_S/K_S + L_L/K_L \quad (7)$$

但し、 $L_S$ 、 $L_L$  はそれぞれ表層、下層の厚さである。それで、第1表に示してあるように、試料10以降は、全層の透水係数  $K_T$  を求めた後に表層を1.5~2 cm 削り取り、 $K_L$  を測定している。尚、 $K_S$  は(7)式から計算した。この結果、灯油の通らなかった氷試料でも、表層を削り

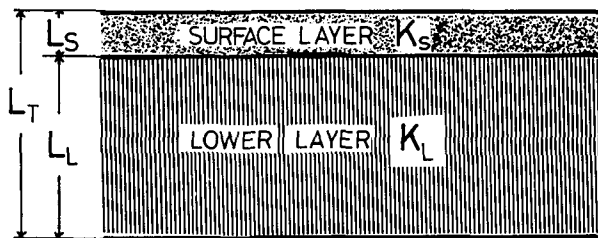
取ったあとの下層は良好な透水性を示すことが分った。以上の結果をまとめて第7図に示した。横軸に  $M(\text{mol/l})$  を縦軸には  $K_T, K_L$  の測定値と  $K_S$  の計算値をとった。この図から分るように、透水系数は  $M$  が増すと飛躍的に増えるが、 $K_L$  は  $M$  がおよそ  $0.3 \text{ mol/l}$  を越えると、 $10^{-2} \text{ cm/s}$  というほぼ一定値に達している。 $K_T$  と  $K_S$  は濃度が  $0.2 \sim 0.6 \text{ mol/l}$  に増えると、それぞれ  $3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$  と指数関数的に増加している。従って、全層の透水性は表層の透水性に大きく依存している。

IV. 考 察

用いた全ての氷試料は表面が約  $-10^\circ\text{C}$  であるから、温度勾配約  $0.8 \text{ deg/cm}$  を持っている。表面から  $-10^\circ\text{C}$  の灯油を通すことにより、氷試料内部の温度に応じた透水的構造が保存される。即ち、表面では  $-10^\circ\text{C}$ 、中層では  $-5^\circ\text{C}$ 、底近くでは  $-1.8^\circ\text{C}$  に応じたブライン排水路の形状が保存される、と考えられる。このため、 $K_S$  が極めて低い値をとったのは、本質的

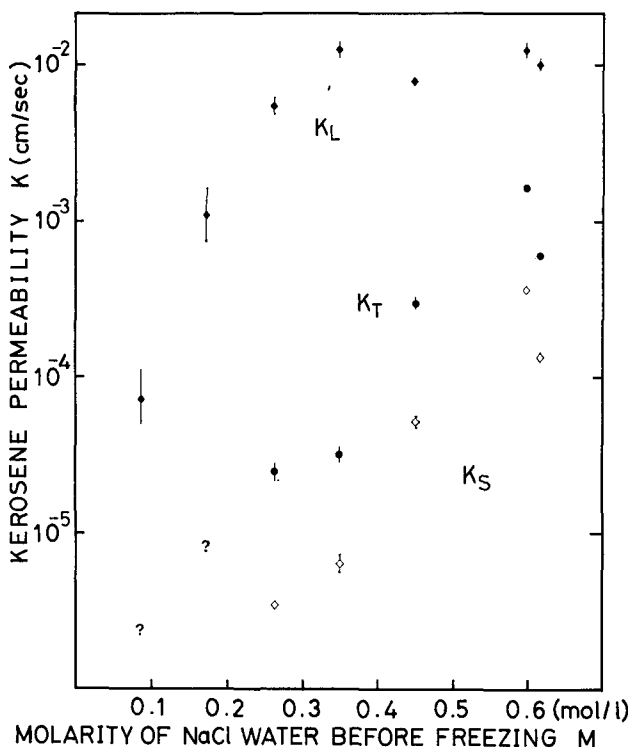
な鉛直方向のブライン排水路の発達の差に加えて、表面で  $-10^\circ\text{C}$  という低温のためブライン胞同士の連絡が少なかったので、透水性が非常に悪かったと考えられる。表層も下層と同温度であれば、 $K_S$  と  $K_L$  の差はある程度小さくなると思われる。

透水系数は氷試料の構造の他に、流体の動粘性係数に依存している。第8図に、用いた着色灯油の粘性係数を毛細管法により各温度で測定した結果を示した。その結果、動粘性係数  $\nu$  の  $-10^\circ\text{C}$  の値は  $-5^\circ\text{C}$  の値に比べ、13% 大きくなる。このため透水系数も同様のことが期待



$$\frac{L_T}{K_T} = \frac{L_S}{K_S} + \frac{L_L}{K_L}$$

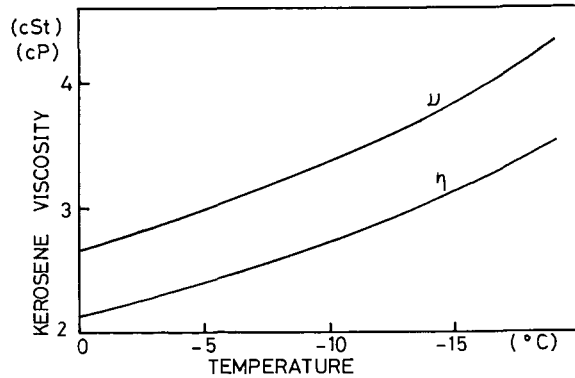
第6図 2層の透水模型



第7図 各層の透水系数と凍らせる前の NaCl の濃度  $M(\text{mol/l})$  との関係

される。このことを確かめるために、 $-10^{\circ}\text{C}$ の灯油を通して透水係数を求めた後、 $-5^{\circ}\text{C}$ の灯油を通して透水係数を求めると、ほぼ同程度透水係数は大きくなった。

次に今回求めた灯油による透水係数をブラインによる透水係数に換算してみる。 $-10^{\circ}\text{C}$ のNaCl水の動粘度は灯油の動粘度の1.09倍であることから、氷試料の内部をブラインが氷を析出しないで浸透するという仮定をすれば、灯油による透水



第8図 用いた着色灯油の粘性係数と温度との関係

$\mu$ ; 動粘性係数  
 $\eta$ ; 静粘性係数

係数をブラインによる透水係数と見直すことができる。また、海水の濃度に近い、 $0.6 \text{ mol/l}$ のNaCl水から生成したNaCl氷の $K_T$ は $0.6 \times 10^{-3} \sim 2.7 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ の範囲にあり、 $K_S$ の値は $1.3 \times 10^{-4} \sim 3.9 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、 $K_L$ の値は $9.1 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ である。これらの値はPounderらの求めた値 $3.4 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ とはほぼ一致している。しかし、Langlebenの求めた通気度はブライン透水係数に直すと $10^{-8} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ であるので、我々の求めた値より極めて小さい。この原因は、Langlebenは海水を切り出して、時間をおいて測定しており、サンプルの径が $7.8 \text{ cm}$ と小さいのでブライン排水路がその径内に入っていなかったためであると考えられる。

## V. 結 語

NaCl氷は切り出すとブラインが流れ落ちて透水の性質が変化するので、容器で $10 \text{ cm}$ に成長したNaCl氷の表面に直径 $30 \text{ cm}$ の円筒を凍着させ、この円筒の内外に $-10^{\circ}\text{C}$ の着色灯油を入れ、外側の油位を内側の油位に合うように調節しながら、内側の油位低下を測る変水位法でNaCl氷の灯油透水係数を求めた。透水の構造の異なる試料を得るために、NaCl水の濃度を $0.09 \sim 0.6 \text{ mol/l}$ に変えてNaCl氷を成長させた。測定の結果、濃度が $0.2 \text{ mol/l}$ 以下の試料の表層は不透水性であったが、その表面から $1.5 \text{ cm}$ 削り取った下層は $5 \times 10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ の透水係数を有していた。このため、他の試料に2層の透水模型を適用し、 $K_T$ 、 $K_L$ から $K_S$ を計算した。 $K_T$ と $K_S$ は濃度が $0.2 \sim 0.6 \text{ mol/l}$ に増えると、それぞれ $3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3}$ 、 $5 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ に指数関数的に増加するが、 $K_L$ は $0.3 \text{ mol/l}$ 以上では、 $10^{-2} \text{ cm/s}$ の一定値に達する(第7図)。従って、全層の透水性は表層の透水性に大きく依存している。尚、海水とほぼ同じ濃度 $0.6 \text{ mol/l}$ から生長した試料の $K_T$ 、 $K_S$ 、 $K_L$ の値はそれぞれ $6 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$ 、 $10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$ 、 $10^{-2}$ の範囲にある。

この研究にあたって、数々の御指導と御便宜をはかって頂いた田畑教授、並びに実験にあたって多くの御助力を頂いた大学院生納口恭明さんはじめ海洋学部門の方々、機関室、金工室の皆様へ感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) Pounder, E. R. and Little, E. M. 1959 Some physical properties of sea ice. I. *Can. J. Phys.*, **37**, 443-473.
- 2) Langleben, M. P. 1959 Some physical properties of sea ice. II. *Can. J. Phys.*, **37**, 1438-1454.

## Summary

Kerosene permeability of NaCl ice was measured at an ambient temperature of  $-10^{\circ}\text{C}$ . As the kinematic viscosity of kerosene is almost of the same magnitude as that of brine at its freezing temperature of  $-10^{\circ}\text{C}$ , kerosene permeability corresponds to brine permeability, assuming that brine may percolate through an ice sample without additional ice deposition.

Samples of NaCl ice were prepared at an ambient temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$  in a polyethylene tank 50 cm in upper diameter, 42 cm in bottom diameter and 85 cm in height, after NaCl water ranging in molarity  $M$  from 0.09 to 0.6 mol/l was put into it.

The permeability of NaCl ice changes as brine flows out of an ice sample, when it is taken from an ice cover. Therefore, the kerosene permeability of NaCl ice was measured using the ice tank itself as a variable head permeameter. To do it, a hollow stainless steel cylinder of 30 cm in diameter was placed and frozen vertically on the surface of NaCl ice 10 cm in thickness  $L$ , then coloured kerosene was poured into the inside and the outside of the cylinder wall (Fig. 1). While the outer kerosene height was controlled so as to be equal to the inner kerosene height, a decrease in the inner kerosene height was measured. A volumetric of the polyethylene tank with a tapered wall was made at time  $t$  by measuring the volume of NaCl water which flowed out. The kerosene head  $H_i$  was obtained by multiplying the NaCl water head by a density ratio  $\rho_N/\rho_K$ , where  $\rho_N$  and  $\rho_K$  are the density of NaCl water and of kerosene respectively. Then, the kerosene permeability of NaCl ice was given by the following equation using the kerosene heads  $H_1$ ,  $H_2$  measured at times  $t_1$ ,  $t_2$  respectively.

$$K = [aL/(t_2 - t_1) A] \ln (H_1/H_2),$$

where  $a$  and  $A$  are the cross section of the cylinder and the ice sample respectively.

The measured values of kerosene permeability of the total layer  $K_T$  are represented in Table 1. It is shown that the NaCl ice grown from NaCl water lower than 0.2 mol/l in  $M$  is impervious. The crystal structure of NaCl ice has two layers. Therefore, the surface layer of 1.5~2 cm in thickness was removed and the kerosene permeability of the lower layer  $K_L$  was also measured. The kerosene permeability of the surface layer  $K_S$  was calculated substituting  $K_T$  and  $K_L$  into the following equation.

$$L_T/K_T = L_S/K_S + L_L/K_L,$$

where  $L_T$ ,  $L_S$  and  $L_L$  are the thickness of the total layer, the surface layer and the lower layer respectively (Fig. 5). The results are also given in Table 1. The values of  $K_T$ ,  $K_S$  and  $K_L$  of NaCl ice grown from NaCl water 0.6 mol/l in  $M$  that had almost the same salinity as natural sea water have the magnitudes of  $6 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  and  $10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$  cm/s respectively.