HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	薄い海氷中におけるブラインの上方移動に関する実験的研究
Author(s)	河西, 孝; 小野, 延雄
Citation	低温科學. 物理篇, 43, 149-155
Issue Date	1985-03-18
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18508
Type	bulletin (article)
File Information	43_p149-155.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Takashi KASAI and Nobuo ONO 1984 An Experimental Study of Brine Upward Migration in Thin Sea Ice. *Low Temperature Science, Ser.* A, **43.** (With English Summary p. 155)

薄い海氷中におけるブラインの上方移動に関する実験的研究*

河西　孝
(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59年10月受理)

I. まえがき

薄い海氷の表面はブラインの薄膜で被覆されていることが知られており，表面ブラインと呼ばれる。表面のぬれ具合はリモートセンシングによる海氷探査において重要なパラメターとなる射出率や海氷表面における熱収支，運動摩擦等に大きな影響を与えている。Martin[1] は厚さ約25 cm の海氷の表面を削りとってその塩分量を測定し，母海水を上まわる50‰の値を得ている。

このような現象が起こる機構の1つとしてブライン排水孔を通るブラインの上方への移動が上げられる。さらにブラインの上方移動の機構として，排水孔中の圧力増加，氷温低下に伴う押し出し，積雪がある場合にはその毛管作用による吸い上げの3つが上げられる。

これらのうち排水孔中の圧力増加によるブラインの上方移動に着目して野外観測と低温室内での海氷の透水係数の測定を行なったので，その結果を報告する。

II. サロマ湖野外観測

北海道オホーツク海沿岸のサロマ湖は海水とほぼ等しい塩分量をもつ塩湖である。冬期には湖面が結氷し，平坦な定着氷が形成される。

1983，1984年の厳冬期，厚さ約20cm の定着氷に2 m×2 mの人工プールをあけ，厚さ5 cm～6 cm の薄氷を張らせて表面の状況を調べた（第1図）。観測地点は岸から約180m沖に出た所で，水深は1.5～2.0mであった。期間中，サーミスター温度計により気温を測定し，必要に応じて薄氷の表面温度も測定した。

1. 表層塩分量

夕刻に開水面を作り夜間に海氷を成長させて，深夜成長中および翌日に薄氷の表層1 mm をかんなで削り，それを融かして屈折率塩分量計により表層塩分量を求めた。かんなには両側に横腕を取りつけて刃の幅よりも広くし，刃をちょうど1 mm だけ出して表層をそれ以上削らないようにした。

積雪のない状態の薄氷表層1 mm の塩分量は母海水の塩分量（約31.0‰）を上まわること

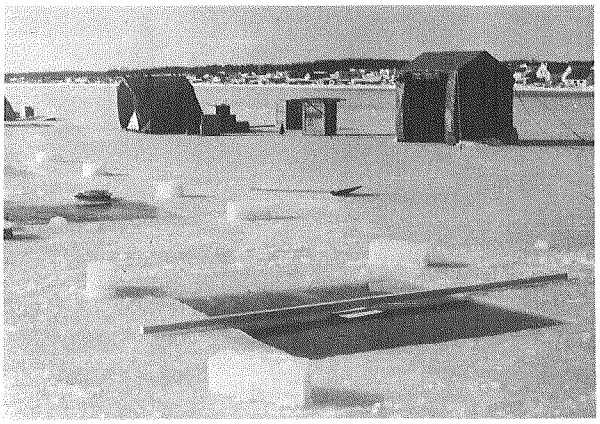
* 北海道大学低温科学研究所業績　第2678号

があり，最大42.4‰の値を示した。一方，定着氷上の積雪は37.0‰まで高塩分化していた[2]。

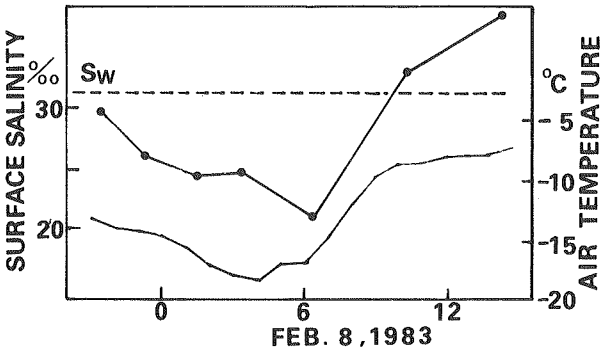
薄氷成長時における表層塩分量の時間変化を第2図に示した。上の折れ線は表層塩分量の変化を，下の折れ線は気温の変化を表わしている。破線は母海水の塩分量31.0‰を表わす。

氷温が低下すると氷中のブラインで氷の析出が起こり，体積変化に伴うブラインの圧力の増加によってブラインが押し出される。この場合は気温が低下しても表層塩分量の増加傾向が見られず，上方への押し出しが顕著には起こらなかったことを示している。

一方，気温が上昇すると表層塩分量も増大し，その後，母海水の塩分量を越えた。表層塩分量が母海水の塩分量を上まわるようになった時刻は，上げ潮の時期に対応していた。母海水を越える表層塩分量が観測されたということは，ブラインの上方移動が起きていたことを意味しており，その機構として前章で上げた3つの主要因を考えるとき，この場合，積雪はなく，氷温上昇時でブラインの押し出しは考えられないから，排水孔中のブラインの圧力増加によって上方移動が起きていたことになる。排水孔中で圧力増加が起こるのは，氷の沈下と水位の上昇の2つの場合であるが，ここでは氷を沈下させるような外力は考えられないので，上げ潮の時期に排水孔中の圧力が増加してブラインが上方移動したと考えざるを得ない。



第1図　測定プール（2 m×2 m）



第2図　薄氷成長時の表層塩分量時間変化
● 表層塩分量
—— 気　　温
---- 母海水塩分量

2．荷重実験

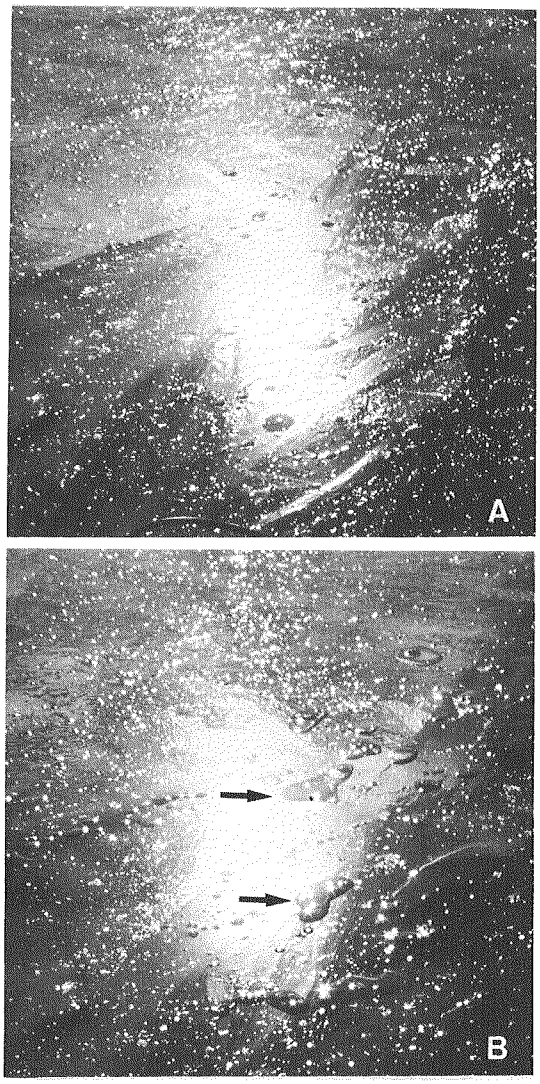
排水孔中のブラインの圧力を増加させるために荷重により氷を沈下させる実験を行なった。

一般に海氷は，軸方位がばらついている粒状結晶の表層と結晶が比較的大きくC軸が水平面内に存在する柱状結晶の下層とからなる。斉藤・小野[3]は，実験室の測定から粒状結晶の層が柱状結晶の層に比べて透水性が悪いことを示している。1984年2月12日夜から13日にかけては風が強く，プールに浮き上がった氷晶が風下へ運ばれて表層に粒状結晶のある氷が風下で形成され，一方風上では表面から柱状結晶の氷が形成された。

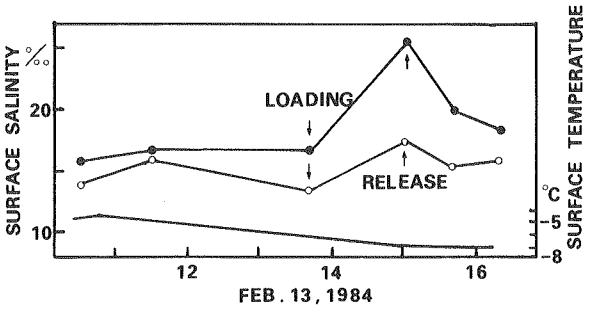
氷のブロックを載せたそり(重さ75kg)をプールのふちに置き，表面へのブラインのしみ出しを観察した。その際に表面ブラインの塩分量も測定した。荷重を置く前の薄氷の表面温度は−6.2℃であった。荷重を置いて3～4分すると柱状結晶の氷の表面にブラインがしみ出し，さらに3～4分おくれて粒状結晶の氷の表面にもブラインが現れた。第3図には，柱状結晶氷について荷重を置く前と置いた後の表面の様子を示した。荷重を置くことによってブラインがしみ出したのがわかる(矢印)。柱状氷の表面上でしみ出してから5分後に採取したブラインは，しみ出し前の表面温度に対応する相平衡濃度(104‰)より低いが母海水を越える78.0‰の塩分量をもっており，表面付近の高塩分ブラインが押されて出てきたと考えられる。表面上のブラインの量は徐々に増加したが，塩分量はその後の10分間で17.5‰低下した。

荷重を置いてからおよそ1時間20分後に取り除くと，表面のブラインは氷中に吸い込まれた。それから1時間10分位経過したところで，まだ表面にはかなりのブラインが残っていた。

荷重を置く前と置いた後の粒状結晶氷と柱状結晶氷の表層塩分量を第4図に示した。黒丸は柱状結晶氷，白丸は粒状結晶氷である。下の実線は薄氷の表面温度を表わす。表面温度はゆっくりと低下していた。両方の氷ともに荷重を置くと表層塩分量が増加し，取り除くと減少した。しかし，その変化量は柱状氷の方が粒状氷よりも大きかった。



第3図　表面へのブラインのしみ出し
A……荷重を置く前　B……荷重を置いた後



第4図　荷重実験における表層塩分量変化
○……粒状結晶氷　●……柱状結晶氷　—……表面温度

Ⅲ. 海氷の透水係数の測定

表面ブラインおよび表層高塩分層の存否を支配するのは海氷の透水性である。ブラインの移動を考える上で重要なパラメターとなる透水係数について，その温度依存と上向き，下向きの異方性を低温室内で調べた。

1. 測定原理（変水位透水法）

断面積 S_A，長さ L の多孔性試料に流体を流す場合，両端の水頭差が I であればその流量 Q はダルシーの法則から動水勾配（I/L）に比例して

$$Q = K\,(I/L)\,S_A \tag{1}$$

で与えられる。ここで K は透水係数である。水頭差 I を2つの水頭 H，h の差

$$I = H - h \tag{2}$$

で与え，この流量 Q を断面積 S_B の降水管の液面変化（$\mathrm{d}H/\mathrm{d}t$）で与えると試料上の水面変化を（$\mathrm{d}h/\mathrm{d}t$）として

$$Q = -S_B\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t} = S_A\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

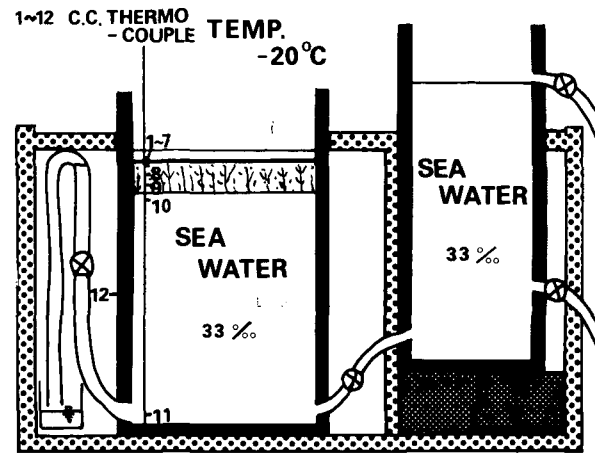
が成立する。$t=0$ の時 $I=I_0$，$t=T$ の時 $I=I$ として積分すると(1)～(3)から

$$K = \frac{bL}{(1+b)\,T}\ln\frac{I_0}{I} \tag{4}$$

が得られる。ここで $b = S_B/S_A$ である。すなわち時刻 0 および T における水頭差 I_0 および I がわかれば透水係数が求まる。

2. 測定装置・方法

測定装置を第5図に示した。2つのタンク（断面積30×30 cm²，および20×20 cm²，高さ共に50 cm）を底近くでゴムホースで接続し，大きなタンクを約－1°C に保った断熱箱の中に置いて，室温－20°C で表面からのみ冷却することにより成長速度一定の海氷をつくった。成長に伴って氷に圧力がかかるのを防ぐために圧ぬきバルブをつけた。熱電対を図のような12か所に設置し，氷温，氷表面上気温，海水温，箱内温度を記録した。表面温度は，氷表面上の3つの高さの熱電対の温度から最小2乗法により求めた表面温度と，氷中の4個所での温度分布から求めた表面温度との平均で定義した。1～7の熱電対の鉛直方向の間隔は3 mm である。氷の成長中，小タンクのまわりはプラスの温度に保って小タンクが凍結しないようにする。氷厚が6 cm になったところで，表面温度があらかじめ決めた温度になるまで赤外線ランプで暖め，温度分布が直線状になってから小タンクにより氷に水

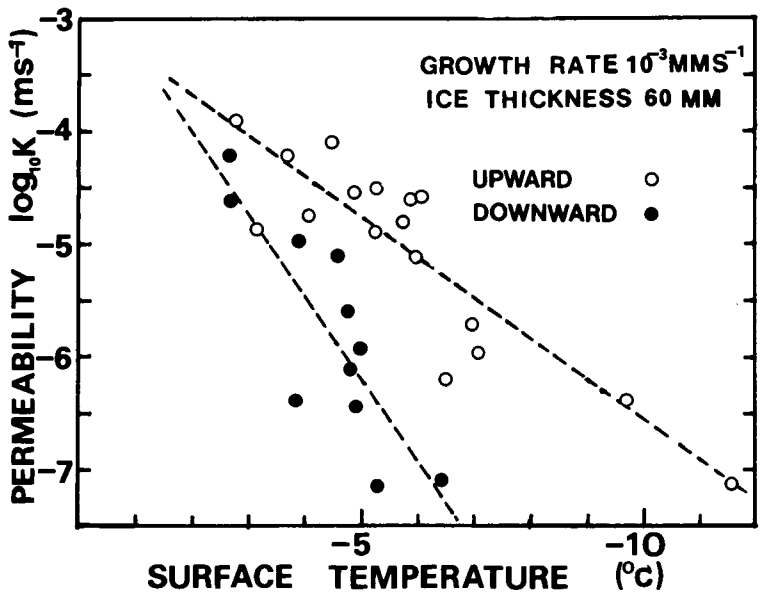


第5図　透水係数測定装置

頭をかける。上向きの透水係数の測定では上のバルブを開け，小タンク内の水位が上のバルブの位置で一定となるようにしながら海水を加えて，2つのタンクの水頭差の時間変化を調べた。下向き透水係数の測定では，氷の上にあらかじめ決めた温度に作っておいたブラインを載せ，下のバルブを開けてあふれさせて小タンクの水位を一定としながら両者の水頭差時間変化を調べた。

3. 測定結果

透水係数の測定結果を第6図に示した。横軸に表面温度，縦軸に透水係数の値が対数目盛でとってある。白丸は上向き透水係数，黒丸は下向き透水係数である。透水係数の値は表面温



第6図　薄い海氷の透水係数の温度依存（厚さ6 cm）

○……上向き透水係数
●……下向き透水係数

度の低下に伴って対数的に減少する。上向き透水係数の方が下向き透水係数より大きく，海氷の透水性には異方性が存在することがわかる。また，この異方性は表面温度が低下するにつれて増大する。薄い海氷（厚さ6 cm）の上向き，下向き透水係数は表面温度が－3 °C で $1\times10^{-4}\,ms^{-1}$，$2\times10^{-5}\,ms^{-1}$，－5 °C で $2\times10^{-5}\,ms^{-1}$，$6\times10^{-7}\,ms^{-1}$，－10 °C で $3\times10^{-7}\,ms^{-1}$ である。－3 °C で上向き透水係数は下向き透水係数の約5倍，－5 °C で約33倍となった。

Ⅳ. 結　　論

野外実験において次のようなことを知った。

気温の上昇時に表層塩分量の増大が見られ，母海水の塩分量を越える場合があった。母海水を越えた時刻は上げ潮の時期に対応しており，上げ潮によってブラインの上方移動が起こったと推論された。

プールのふちに荷重を置くとブラインがしみ出し，取り除くと吸い込まれた。取り除いてからほぼ荷重時間に等しい時間が経過したところでは，表面にまだかなりのブラインが残っていた。

表層が粒状結晶の氷と柱状結晶の氷とでは，荷重後のブラインのしみ出しに差が見られ，粒状結晶の方がしみ出すのに時間がかかり，表層塩分量の変化も小さかった。

低温室内の測定では次のようなことがわかった。

海氷の透水係数は表面温度の低下に伴い，対数的に減少する。上向き透水係数は下向き透水係数より大きく，その異方性は表面温度の低下に伴い増大する。薄い海氷（6 cm）の上向き透水係数および下向き透水係数は -3 °C でそれぞれ $1\times10^{-4}\,\mathrm{ms}^{-1}$，$2\times10^{-5}\,\mathrm{ms}^{-1}$，$-5$ °C で $2\times10^{-5}\,\mathrm{ms}^{-5}$，$6\times10^{-7}\,\mathrm{ms}^{-1}$，上向き透水係数は -10°C で $3\times10^{-7}\,\mathrm{ms}^{-1}$ となった。

透水係数のデータから野外実験の結果が説明できる。

表層塩分量が母海水塩分量を越えた事例の気温の上昇から表面温度が5～10deg 昇温したと考えると，透水係数はおよそ2けた大きくなる。このような透水性の向上と上げ潮による排水孔中の圧力増加とが相まって，ブライン上方移動が起こり，表層が母海水を越えて高塩分化するに至ったと考えられる。

荷重実験において見られた表面へのブラインのしみ出しと吸い込みの時間の差は，上向き透水係数より下向き透水係数が小さいことの反映であろう。斉藤・小野[3] は粒状結晶氷の透水係数が柱状結晶のものより小さく，海氷の透水性が表層の粒状結晶の層の透水性に支配されていることを指摘している。表層に粒状結晶をもつ氷と表面から柱状結晶として成長した氷における荷重後のブラインのしみ出しまでの時間差，表層塩分量の推移などはそのことを裏付けている。

透水係数の測定結果は，氷が薄く，表面温度が比較的高くて透水性のよい時に上方移動したブラインが，下向き透水性の悪さと表面温度低下に伴う透水性の急激な悪化，および氷厚増加に伴う動水勾配の減少によって表層に維持されることを示している。

なお，この透水係数の測定は厚さ6 cmの薄い海氷についてのみ行なったものであり，さらにより厚い氷についての測定を考えている。

終りに，北海道大学低温科学研究所の若土正暁講師，滝沢隆俊助手，大学院生本井達夫氏には有益な御助言を頂いた。また，サロマ湖観測の際には流氷研究施設の河村俊行助手，大井正行，石川正雄，福士博樹，各技官に多大の御助力を頂いた。低温科学研究所石川信敬助手には野外観測中の気温のデータを頂いた。ここに記して感謝いたします。

文　　献

1) Martin, S. 1979 A field study of brine drainage and oil entrainment in first-year sea ice. *J. Glaciol.* 22, 473-502.

2) 滝沢隆俊 1984 海氷上の積雪の特性とゆき氷の形成 II. 低温科学，物理篇，43，157-161.

3) 斉藤　隆・小野延雄 1978 海氷の透水性 I. NaCl 氷の透水係数の測定. 低温科学，物理篇，37，55－62.

Summary

The high-salinity surface layer of young sea ice was subjected to field and laboratory experiments. Artificial pools, in which young ice was formed, were opened within a fast-ice sheet in the lagoon Saroma, Hokkaido, in February of 1983 and 1984. The salinity of the 1 mm thick surface layer of the young ice was as high as 42.4 ‰, which exceeds the seawater salinity of 31.0‰. The surface salinity increased with rising air temperature. When a load (75 kg) was placed on the fast ice near the pool, the seeped brine of 72.5 ‰ in salinity was observed on the surface of the young ice; and when the load was removed, the brine disappeared. Meanwhile, brine permeabilities, both upward and downward, were measured in the laboratory. It was found that both permeabilities decreased logarithmically with lowering surface temperature. Such a remarkable anisotropy was observed as the upward permeability was greater than the downward permeability, and the ratio of the upward to the downward permeability increased with lowering surface temperature from 5 at −3°C to 33 at −5 °C. The upward and the downward permeability (ms^{-1}) were, respectively, 1×10^{-4} and 2×10^{-5} at −3°C, 2×10^{-5} and 6×10^{-7} at −5°C, and at −10°C the upward permeability was 3×10^{-7}. It is concluded from the measured permeabilities that the high-salinity surface layer is formed when the sea ice is not so thick and the surface temperature is comparatively warm as a consequence of upward brine migration and maintained afterwards. Though the sea ice is permeable upward when the surface temperature is comparatively warm, the sea ice is not so permeable downward as upward and the brine which seeps onto the surface because of a pressure increase within the brine channels continues to stay within the surface layer. Furthermore, a rapid decreace in downward permeability with increasing ice thickness contributes to the continuous stay of the brine within the surface layer.