



Title	アイス・サンドウィッチについて
Author(s)	堀口, 薫; Miller, R. D.
Citation	低温科学. 物理篇, 40, 137-145
Issue Date	1982-03-10
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18444
Type	bulletin (article)
File Information	40_p137-145.pdf



[Instructions for use](#)

“アイス・サンドウィッチ”について*

堀 口 薫
(低温科学研究所)

R. D. Miller
(Cornell University)
(昭和56年10月受理)

I. ま え が き

“アイス・サンドウィッチ”とは、氷点よりも僅かに低い温度において、両側から多孔質の膜で挟まれた薄い氷が完全な半透膜としての作用を有することに対して名付けられた名前である¹⁾。アイス・サンドウィッチの中で氷を通しての質量輸送は、氷の一方の面では凍結が起り、それと同時に氷の他方の面で融解が起ることによるものであり、これは一種の復氷現象であると Miller¹⁾ (1970) は考えた。その後、この現象は凍土に関する研究をしている人達の間で広く知られている。

Burt 等²⁾ (1974) は凍土の透水係数の測定に際し、あらかじめアイス・レンズを含んだ凍土を作り、レンズを含んだために凍土全体の透水係数が減少する程度を調べた。しかし、期待した程の減少はなく、氷自身も凍結と融解によって移動し、その結果として氷自身も見かけ上透水性を有することを確かめた。Horiguchi 等³⁾ (1980) は、アイス・サンドウィッチの中で、融点に近い温度にある氷を通しての質量輸送には3つの可能な方法があると考えた。第1は凍結と融解によって氷自身が動くことによる質量輸送であり、これは復氷現象によって固体の水を介して起る輸送である。第2は氷の結晶粒界を通して液体の水の形で起る質量輸送である。第3は氷と装置との境界を通して液体の水の形で行なわれる質量輸送である。しかし、実験の結果、第1の方法によってのみ質量輸送が行なわれることを確かめた。Philip⁴⁾ (1980) は凍土中の土粒子の間隙にある氷の復氷現象による輸送量を簡単な場合について理論的に計算し、間隙水の透水係数を推定した。

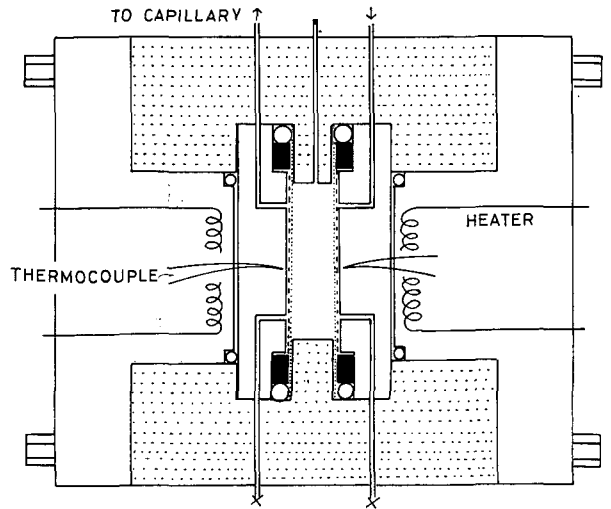
この論文では、アイス・サンドウィッチの中の氷に水圧勾配あるいは温度勾配をかけたとき、復氷現象によって質量輸送が起ることを述べ、同時に復氷現象のため氷に見かけの透水の係数が存在することについて考察を行なう。

II. 実 験 装 置

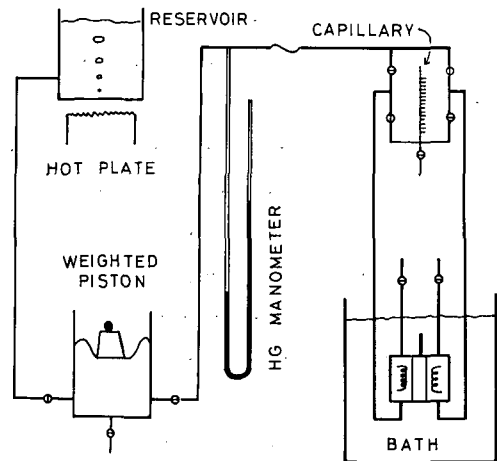
アイス・サンドウィッチの実験装置の主要部分である氷の試料を入れるセルを第1図に示す。中央には薄い円板状の氷(直径2.9 cm, 厚さ0.3 cm)がある。この氷は、固定されたスチー

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2396号

ル製の網で支えられたミリポア・フィルターで両側から挟まれている。スチールの網の外側には銅製の部品(図中、白い部分)がある。この銅の部品には過冷却水を通すための細い穴が振けてある。更に、スチール網に近い方の表面近くには熱電対が埋め込まれている。中央の氷とこの銅の表面までの距離は、ミリポア・フィルターとスチールの網の厚さだけ隔たって、約0.025 cmである。氷にかけられた見かけの温度勾配は、これらの1対の熱電対から得られた温度差を氷の厚さ0.3 cmで除して求められた。この銅製の部品の外側には、断熱をよくするために、約0.18 cmの隙間を置いてニクロム線が埋め込まれた別の銅製の部品がある(今回の実験では、この隙間には水が入られた)。このニクロム線を通る電流を調節することにより、必要に応じて、氷の試料に温度勾配がかけられた。第1図で濃淡をつけた部分は熱伝導率の小さいナイロンより出来ている。水漏を防ぐために、試料セルには4個のOリングが用いられている。氷の入る中央の小室に



第1図 試料セル



第2図 実験装置の概略

上部より連結している細い管は種水用である。実験装置全体の制御と測定の概略を第2図に示す。装置の各部分の連結には、高い水圧に耐えるように、銅管とOリング付きの真鍮製のコック栓が使われた。装置全体は、必要に応じて、脱ガスされたイオン交換蒸留水で洗浄された。第1図の試料セルは恒温槽の中に入れられ、コック栓の操作により、いずれの側からでも氷に静水圧をかけることができ、他方の側は流出量を調べるために補正された毛細管に連結できる。この毛細管は大気に連っている。冷凍機その他からの機械的振動等により、氷からミリポア・フィルターを隔てて存在する過冷却水の凍結を防ぐために、試料セルは天井より吊るされている。

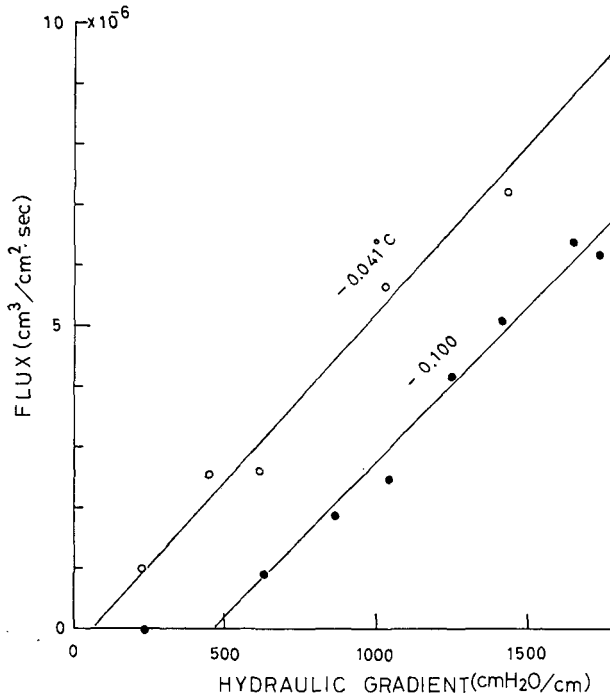
ミリポア・フィルターには、GSWP 04700の間隔径0.22 μm のフィルターが用いられた。その透水係数は $(1.10 \pm 0.07) \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ であった。

恒温槽の温度は、数時間にわたりその変動が約 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ になるように制御され、これはベックマン温度計と自記録計で読まれた。温度は階段状に上げ下げされ、平衡に達するまで6時間以上放置された。

III. 実験結果

次の3つの方法によって、氷を介しての質量輸送が調べられた。

実験 1. 氷に水圧勾配のみをかけ、温度勾配をかけない方法。氷の中心の温度が -0.041°C と -0.100°C のときの氷を介して輸送されて来る水の流出量とかけられた水圧勾配との関係を第3図に示す。縦軸は、毛細管中で測られた流量より求められた流出量を示す。その正の値は大気圧より高い静水圧のもとにある過冷却水が氷を介して大気圧下にある過冷却水の方に輸送されたことを示す。横軸はかけられた水圧勾配である。各々の温度に於て、測定点は、それぞれ、1本の直線で近似することができ、水圧勾配が大きい程、流出量は多くなる傾向がみられた。



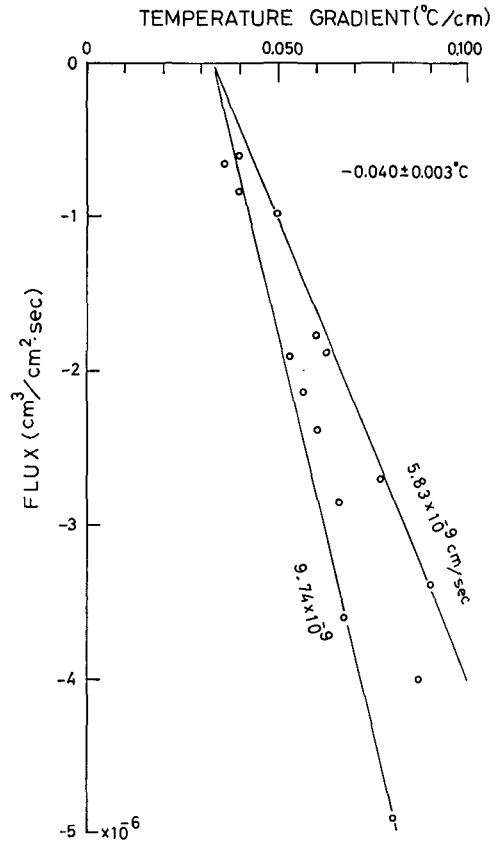
第3図 水の流出量と水圧勾配の関係

実験 2. 温度勾配のみをかけ、水圧勾配はかけない方法。温度勾配をかけるのには、一方のヒーターのみが用いられた。温度勾配を変えると、氷の中心の温度も多少許わる。したがって、この実験2では、温度勾配を変化させても氷の中心の温度が一定になるように恒温槽の温度が制御された。氷の中心の温度を一定の $-0.040 \pm 0.003^{\circ}\text{C}$ に保ったときの水の流出量と見かけの温度勾配との関係を第4図に示す。縦軸は流出量を示す。流出量の負の値は、流れの方向が温度勾配の方向と逆であることを示す。見かけの温度勾配が大きくなると、負の流出量が増

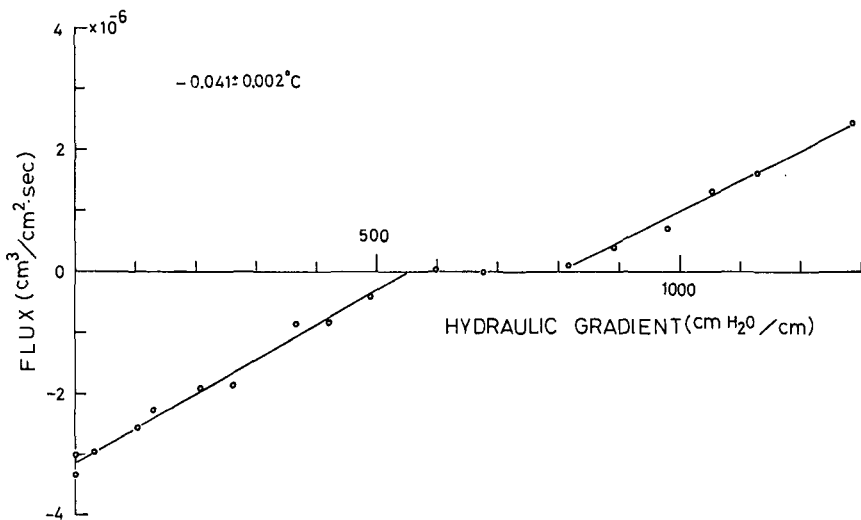
加する傾向がみられた。温度勾配が約 0.034°C 以下では流出量は観測されなかった。

実験 3. この実験では、恒温槽の温度を一定に保ち、水圧勾配と温度勾配の両方が同じ方向から氷にかけられた。実験結果の 1 例を第 5 図に示す。縦軸は水の流出量を示す。負の値は、氷にかかっている温度勾配とは反対の方向に質量輸送が起ったことを示す。この実験例では $0.070^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ の見かけの温度勾配がかけられた。横軸は氷にかけられた水圧勾配を示す。第 5 図に示した実験期間中、氷の中心の温度はほぼ一定の値 $-0.041 \pm 0.002^{\circ}\text{C}$ を示した。しかし、見かけの温度勾配には若干の変動が観測された。即ち、水圧勾配をかけないときには $0.070^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ であるが、水圧勾配を大きくして水の流出が無くなるときには $0.090 \pm 0.001^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ となり、更に水圧勾配を大きくして $1287.5 \text{ cm H}_2\text{O}/\text{cm}$ のときには $0.108^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ であった。水の流出量の違いによって変るこのような見かけの温度勾配の変動は、氷の凍結と融解による潜熱の放出と吸収によって生じたものである。

水圧勾配が大きくなると、流出量も増加する傾向を示した。しかし、水圧勾配が 550



第 4 図 水の流出量と見かけの温度勾配との関係。氷の中心の温度は $-0.040 \pm 0.003^{\circ}\text{C}$



第 5 図 温度勾配をかけたときの流出量と水圧勾配の関係

cm H₂O/cm よりも小さい領域では流出量は負の値を示し、550 から 800 cm H₂O/cm の間では流出量は無く、800 cm H₂O/cm よりも大きい水圧勾配のもとでは流出量は正の値を示した。

IV. 考 察

実験結果の考察に当り、次の2つのことが仮定された。

仮定 1. ミリポア・フィルターのところで水と過冷却水が共存し、一方のフィルターのところでは過冷却水の凍結が起り、他方のフィルターの所では氷の融解が起って、この結果として質量輸送が生ずるのであるが、その輸送量が少ないので氷—過冷却水の界面では平衡状態であると仮定する。そして、この界面において次のクラウジウス—クラペイロンの式を適用する。

$$\frac{U_w}{\rho_w} - \frac{U_i}{\rho_i} = \frac{L}{T_0} (T - T_0) \quad (1)$$

ここで U_w と U_i は、それぞれ、過冷却水と氷のゲージ圧であり、 ρ_w と ρ_i は過冷却水と氷の密度である。 T はミリポア・フィルターのところでの氷と過冷却水の共存温度 (°K) であり、 L は単位質量当りの氷の融解潜熱である。

仮定 2. 氷の中での応力分布は等方的であると仮定し、氷を介しての質量輸送に対して一般化されたダルシーの法則を利用する。

$$q_i = -K_i \frac{\Delta H_i}{\Delta l} \quad (2)$$

ここで q_i 、 ΔH_i と Δl は、それぞれ、氷の流量、氷の両面間での圧力差及び氷の厚さである。比例定数 K_i は復氷現象による氷の透水係数と呼ぶことにする。

実験 1 の考察 この実験では、ミリポア・フィルターを介して氷と接している過冷却水の圧力が高い方から圧力の低い方に向って質量輸送が起った。この輸送は、圧力の高い過冷却水と氷との界面で氷が形成され、反対側の圧力の低い過冷却水—氷界面では氷が融けたことを意味する。このために、氷が成長する界面では潜熱の放出により温度は若干上昇し、反対に氷が融ける界面では温度は若干低下する。氷の移動速度とこの温度上昇(又は低下)量との関係は既に報告された³⁾。

氷が形成されつつある界面の氷の圧力を $U_i(h)$ とすると、この値は(1)式より求まる。

$$U_i(h) = \frac{\rho_i}{\rho_w} U_w(h) - \frac{\rho_i L}{T_0} (T_h - T_0) \quad (3)$$

ここで $U_w(h)$ は過冷却水のゲージ圧であり、 T_h は氷が成長しつつある界面の温度である。一方、氷の反対側、つまり融けつつある氷の界面の圧力は

$$U_i(l) = - \frac{\rho_i L}{T_0} (T_1 - T_0) \quad (4)$$

である。ここで T_1 は氷—過冷却水界面の温度である。したがって、氷の試料を通しての氷圧降下は次式で表わされる。

$$\Delta H_i = \frac{\rho_i}{\rho_w} U_w(h) - \frac{\rho_i L}{T_0} \Delta T \quad (5)$$

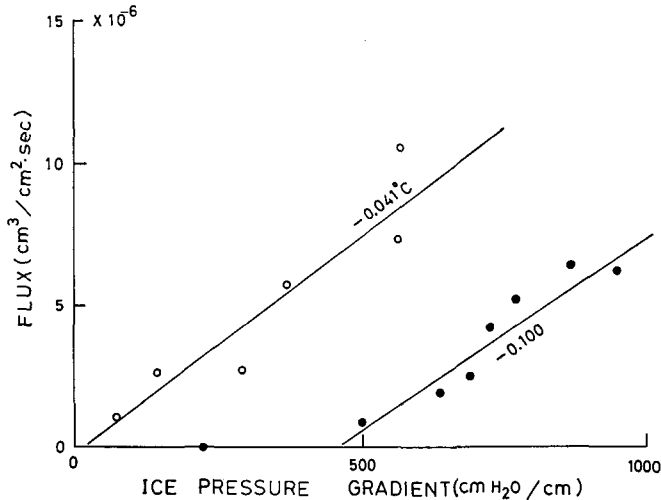
ここで ΔT は $T_h - T_l$ であり、氷の両方の界面の温度差である。

質量保存の法則と (2) 式から、毛細管中で測定された水の流出量は

$$\begin{aligned} q_w &= -\frac{\rho_i}{\rho_w} K_1 \left[\frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{U_w(h)}{\Delta l} - \frac{\rho_i L}{T_0} \frac{\Delta T'}{\Delta l} - \frac{\rho_i L}{T_0} \frac{\delta T}{\Delta l} \right] \\ &= -\frac{\rho_i}{\rho_w} K_1 \left(\frac{\Delta H_i'}{\Delta l} - C \right) \end{aligned} \quad (6)$$

である。ここで $\Delta T'$ は試料セルに埋め込まれた熱電対で測定された温度差である。 δT は $\Delta T - \Delta T'$ で表わされ、氷の両面間での温度差と熱電対で測られた温度差との違いであり、その大きさは実験装置と測定条件によって異なる。実験 1 では δT は正である。 $\Delta H_i'$ は、両方の過冷却水の圧力差と熱電対で測定された温度差から求められ、氷の両面間の見かけの氷圧差である。 C は $\frac{\rho_i L}{T_0} \frac{\delta T}{\Delta l}$ であり、実験装置と測定条件によって決まる定数である。

流出量 q_w と見かけの氷圧勾配 $\Delta H_i'/\Delta l$ を用いて、第 3 図のデーターを書き変えて、第 6 図に示す。第 3 図に比べて、第 6 図では測定点にばらつき大きい、それぞれの温度に対して各点は直線で近似できる。これらの直線の勾配より、 -0.041°C と -0.100°C の氷温に対して K_1 は、それぞれ、 1.68×10^{-8} と 1.47×10^{-8} cm/sec であった。一方、第 3 図から求めた K_1 は、それぞれ、 6.09×10^{-9} と 5.67×10^{-9} cm/sec である。同一氷温におけるこれらの違いは熱電対による温度の測定誤差に起因している。



第 6 図 流出量と見かけの氷圧勾配との関係

第 3 (又は 5) 図において、水圧 (氷圧) 勾配が小さいときには流出量は観測されなかった。そして、流出が起り始める水圧 (氷圧) 勾配は、氷温が低い程、大きい。このような水圧 (氷圧) 勾配の存在は、既に報告³⁾ したように、装置と円板状氷の側面との間の摩擦によるものである。

実験 2 の考察 この場合の流出量は次式で与えられる。

$$q_w = \frac{\rho_i}{\rho_w} K_1 \left(\frac{\rho_i L}{T_0} \frac{\Delta T'}{\Delta l} + C \right) \quad (7)$$

実験2では δT は常に負である。第4図から(7)式によって K_i を求めると約 7.79×10^{-9} cm/secであった。

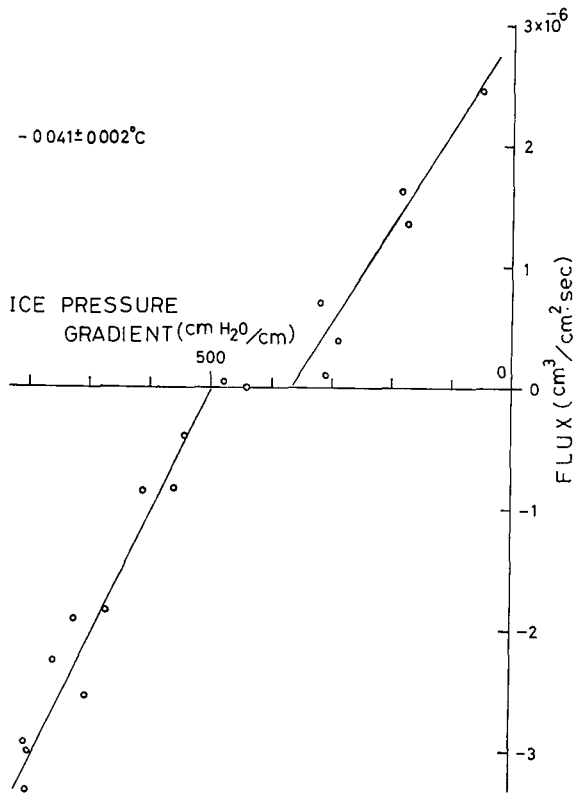
見かけの温度勾配が約 $0.034^\circ\text{C}/\text{cm}$ よりも小さいときには流出量は観測されなかった。これは装置と氷の側面との間の静止摩擦によるものである。

実験3の考察 この実験では、流出量 q_w は次式で与えられる。

$$q_w = -\frac{\rho_i}{\rho_w} K_i \left(\frac{\Delta H_i}{\Delta l} - C \right) \quad (8)$$

この場合も δT は負である。第5図に示したすべての測定点に対して、流出量と見かけの氷圧勾配との関係を得た。この結果を第7図に示す。縦軸は流出量であり、横軸は見かけの氷圧勾配である。流出量が正と負の各々の領域で、各測定点は1本の直線で近似できる。その勾配から K_i を求めると、流出量が負の領域では約 1.13×10^{-8} cm/secであり、正の領域では約 8.62×10^{-9} cm/secであった。流出量が正と負の領域では氷の移動する方向は反対である。第5と7図に於て、流出量が測定されない氷圧(又は氷圧)勾配の存在は、既に報告したように³⁾、氷の移動が始まるときに氷と装置のナイロン部分との接触面に働く摩擦によるものであり、氷の温度が低い程この領域も広くなる傾向がみられた。

第7図において、見かけの氷圧勾配が $-455.5 \text{ cm H}_2\text{O}/\text{cm}$ のときの流出量は $0.01 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ であり、非常に少ない。また、このときの測定された温度差 $\Delta T'$ は 0.08°C であった。もし、この時の流出量を



第7図 温度勾配をかけたときの流出量と見かけの氷圧勾配との関係

第1表

Temp. of ice (°C)	$K_i \times 10^8$ (cm/sec)	ΔT (°C)	$\Delta T'$ (°C)	C
-0.015 ± 0.003	2.48, 2.48	0.016	0.030	-531.4
-0.037 ± 0.002	1.05, 1.60	0.027	0.040	-493.4
-0.041 ± 0.002	0.86, 1.13	0.016	0.028	-455.5
-0.047 ± 0.003	0.68, 2.50	0.014	0.022	-303.7
-0.104 ± 0.001	0.45, 1.04	0.024	0.037	-493.4

0と見做すと、(8)式より定数 C の値は $-455.5 \text{ cm H}_2\text{O/cm}$ である。故に δT は -0.012°C である。 δT は $\Delta T - \Delta T'$ であるから、この測定条件における氷の両界面間の真の温度差 ΔT は 0.016°C であることがわかる。

上述と同じ計算を異なる氷の温度の実験結果に適用した。その結果と各温度での透水係数 K_i の値を第1表に示す。この表の氷の温度は氷の中心の温度を意味する。氷の温度が異なっても K_i には大きな違いは見られなかった。このことは氷を通して液体の水の形での質量輸送が無いことを暗に示している。何故ならば、もし水の形で質量輸送が行なわれていれば、氷の温度の低下につれて流出量が急激に減少し、その結果 K_i に大きな減少が期待されるからである。この表から、定数 C は大体一定の値を示している。このことは定数 C が、主に、実験装置に依存していることを意味している。しかし、同一装置でも若干の違いがみられた。この違いは各々の実験に対して試料セルを組立てる際の不均一性と温度 $\Delta T'$ の測定誤差によるものと考えられる。

以上の考察により、復氷現象による氷の透水係数は、氷の温度が 0°C から約 -0.1°C の範囲で、ほぼ一定の値 $0.5 \sim 1.5 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ を有することがわかった。

この実験は、著者の一人堀口がアメリカのコネル大学に客員研究員として滞在中に行なった研究の一部である。

文 献

- 1) Miller, R. D. 1970 Ice sandwich: Functional semipermeable membrane. *Science*, **169**, 584-585.
- 2) Burt, T. P. and J. P. Williams 1974 Measurement of hydraulic conductivity of frozen soils. *Can. Geotech. J.*, **11**, 647-650.
- 3) Horiguchi, K. and R. D. Miller 1980 Experimental studies with frozen soil in an "Ice sandwich" permeameter. *Cold Region Science and Technology*, **3**, 177-183.
- 4) Philip, J. R. 1980 Thermal fields during regelation. *Cold Region Science and Technology*, **3**, 193-203.

Summary

Discussions were made of mass transport through rigid ice under imposed hydraulic gradients and/or temperature gradients using an "ice sandwich" apparatus, which is shown in Figs. 1 and 2. The experimental data was analyzed under the following assumptions: first, the Clausius-Clapeyron equation is applicable to an ice-water interface at a millipore filter; secondly the generalized Darcy's law is applicable to the mass transport of ice. The discussions were mainly dwelled on an "apparent hydraulic conductivity" of rigid ice which was considered by means of a regelation process.

Three methods were used in the application of a pressure gradient to an ice sample:

In method 1 only a hydraulic gradient was applied to the ice sample through supercooled water, the sample having been given temperature. Cumulative outflow occurred from the high to the low hydraulic pressure side through ice, as shown in Fig. 3. Namely, water-flux occurred from the high to the low pressure side. An "apparent hydraulic conductivity" K_i

of ice due to regelation was about 1.68×10^{-8} and 1.47×10^{-8} cm/sec for -0.041 and -0.100°C , respectively. In method 2 only a temperature gradient was applied to the ice sample, which was kept under a given temperature for each experimental run. Cumulative outflow occurred from the low to the high temperature side of the ice sample; namely, outflow was observed in the direction opposite to the direction of an imposed temperature gradient, as shown in Fig. 4. In this case, K_i was about 7.79×10^{-9} cm/sec for -0.040°C . In method 3 both temperature and hydraulic gradients were applied to the ice sample in the same direction. One of the experimental results is shown in Fig. 5, where the imposed temperature gradient and temperature of ice were $0.070^\circ\text{C}/\text{cm}$ and -0.041°C , respectively, and negative flux means that cumulative outflow occurred from the low to the high temperature side of the ice sample. The abscissa represents the hydraulic gradient which was applied to supercooled water within a reservoir being separated from ice by a millipore filter. The value of K_i was 5.70×10^{-9} and 5.00×10^{-9} cm/sec for a negative and a positive region of flux, respectively.