



Title	海氷の熱的性質の研究 I : 薄い一冬氷の熱伝導率の測定
Author(s)	小野, 延雄; ONO, Nobuo
Citation	低温科学. 物理篇, 23, 167-176
Issue Date	1965-03-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18029">https://hdl.handle.net/2115/18029</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	23_p167-176.pdf



## 海水の熱的性質の研究 I\*

薄い一冬氷の熱伝導率の測定

小野 延 雄

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和 39 年 12 月受理)

### I. ま え が き

海水の成長や融解の問題,あるいは,氷のある海と大気との熱交換の問題を研究するにあたっては,海水の熱伝導率,温度拡散率,比熱などの熱的性質の値が必要である。これらの値は,いままでのところ,主として北氷洋の厚い海水で測定されてきた<sup>1-3)</sup>。

北海道のオホーツク海沿岸で見られる海水は,厚さが 20~30 cm で塩分を多く含む“薄い一冬氷”である。このような薄い海水では,氷層内の塩分の分布や結晶粒の形状などが深さによって異なるので<sup>4,5)</sup>,その熱的性質も深さと共に変化するものと考えられる。しかし,こういう“薄い一冬氷”の熱的性質は,これまでほとんど調べられたことがない。

筆者は,1964年の2月中旬に,オホーツク海岸の紋別で,港内に張りつめた海水“薄い一冬氷”について,いくつかの深さでの温度変化と表面での熱流量とを測定した。その際,定常的な温度分布を得やすくするために,海水の表面に熱源を置いて氷層中の温度を人為的に操作した。こうして得た氷層中のほぼ定常的な鉛直温度分布と,その時の表面での熱流量とから,各深さごとの熱伝導率の値を求めた。

また,1962年と1963年にも,氷層の温度をいくつかの深さで測定した。ただし,熱流量の測定を行なわなかったので熱伝導率の絶対値を知ることはできなかったが,ほぼ定常的な鉛直温度分布から,各深さごとの熱伝導率をある深さに対する相対値として求めることができた。

その結果として,“薄い一冬氷”の熱伝導率には鉛直変化が認められた。得られた値を氷層中の塩素量の分布や北氷洋の厚い海水での測定値などと比較しながら,熱伝導率とブラインの量との関係について考察をおこなった。

### II. 氷 温 の 測 定

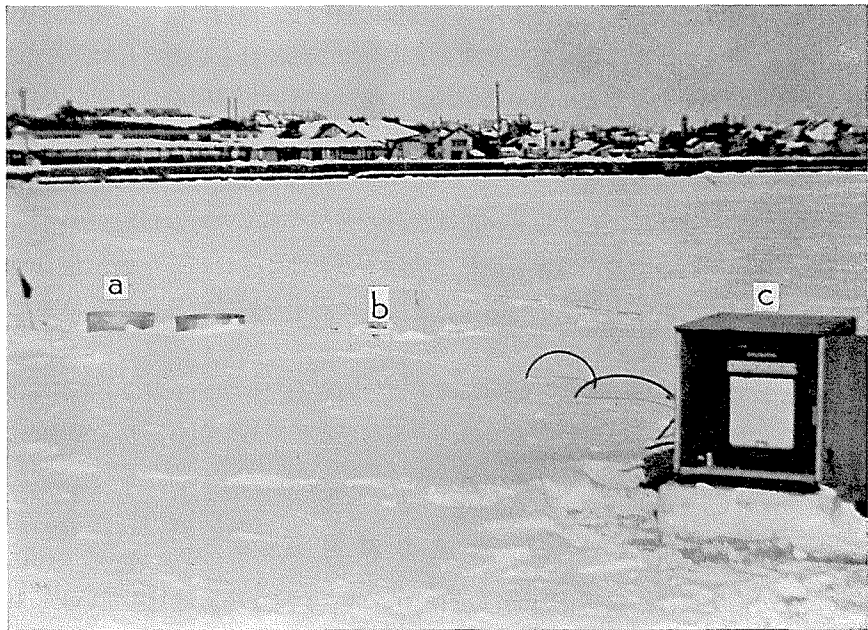
氷層の温度の測定には,直径 0.5 mm の銅・コンスタンタンの熱電対を用いた。1962年に測定した氷層の厚さは約 22 cm であり,熱電対を氷の表面から 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 13,

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 703 号

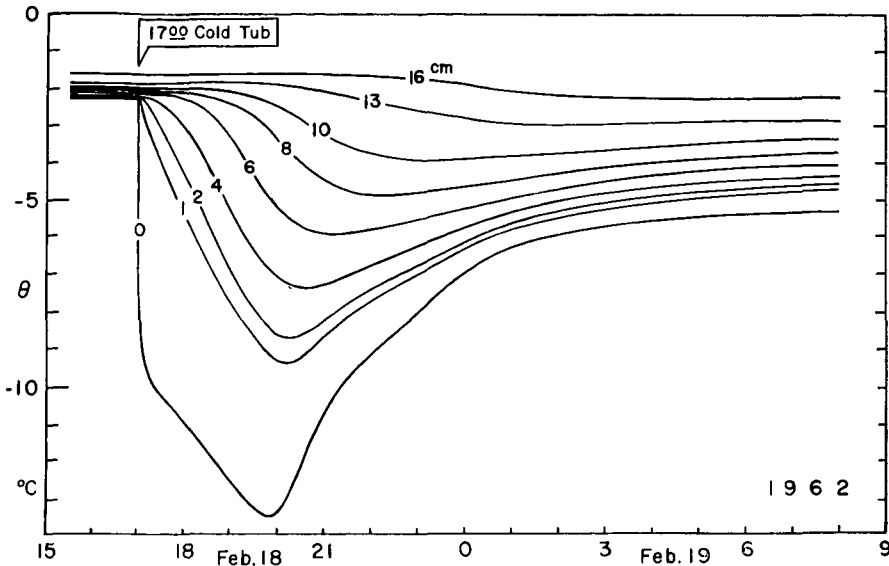
16 cm の各深さに埋めた。1963 年には、26 cm の厚さの氷層で、表面から 0, 1, 4, 7, 10, 15 cm の各深さの氷の温度と、表面上 1, 2, 10 cm の気温、および、表面から約 35 cm 下の海水の温度を測定した。1964 年の氷の厚さは約 24 cm であり、表面下 1 cm から 2 cm ごとの等間隔に 10 本の熱電対を埋設した。熱電対の埋設にあたっては、氷層に水平断面が V 字形の穴をあけ、導線の途中をポリスチロールやアクリル樹脂の棒で固定した熱電対の感温部が、それぞれ V 字形の穴の先端で所定の深さになるようにして凍りつかせた。

第 1 図は、1964 年の測定の様子を示した写真である。熱電対は図で a と記した容器の下の氷層中に、表面の雪を取除いて埋めてある。この a は直径およそ 70 cm のトタン製の容器である。このような容器を 2 つ作り、その 1 つには海水を汲みいれて  $-2^{\circ}\text{C}$  前後の暖かい熱源とし、他の 1 つには塩と雪とで作った寒剤を入れて  $-20^{\circ}\text{C}$  近い冷たい熱源とした。氷層中の温度の変化が短い周期の気温の変動の影響で複雑になるのを避けるために、熱電対を埋めた氷の上にこの 2 つの容器を適当に置きかえたり、そのまま放置したりして海水の温度を人為的に変化させた。容器の直径は氷の厚さの約 3 倍であり、容器の中心を熱電対の上に置くようにしたので容器のそとの影響は無視できるものと考えられる。図の b は零接点用のジャーである。ジャーはポリスチロールの箱に入れ、その箱を半分ほど海氷中に埋めて低い気温の影響をできるだけ少なくするようにした。

熱電対の熱起電力を増幅して 12 打点の記録計 c に自記させた。増幅率は変えることができ、最大の場合には記録紙の幅 25 cm が  $1.5^{\circ}\text{C}$  に相当する。ある深さの熱電対が示す温度は 2



第 1 図 測定状況 (1964) a: 熱源容器,  
b: 零接点用ジャー, c: 記録計



第2図 人為操作による水温変化の例

分ごとに記録される。

氷の上に熱源を置く方法による海氷の温度の人為操作は1962年と1964年とにおこなった。第2図には一例として暖かい熱源をしばらく置いたのち、冷たい熱源に取換えてそのまま放置した場合の温度変化の記録を示した。放置しているうちに寒剤の雪が融けて次第にその温度が上り、それにつれて氷層中の温度も高くなり、記録の最後の期間ではほぼ定常的な温度分布になったことがわかる。

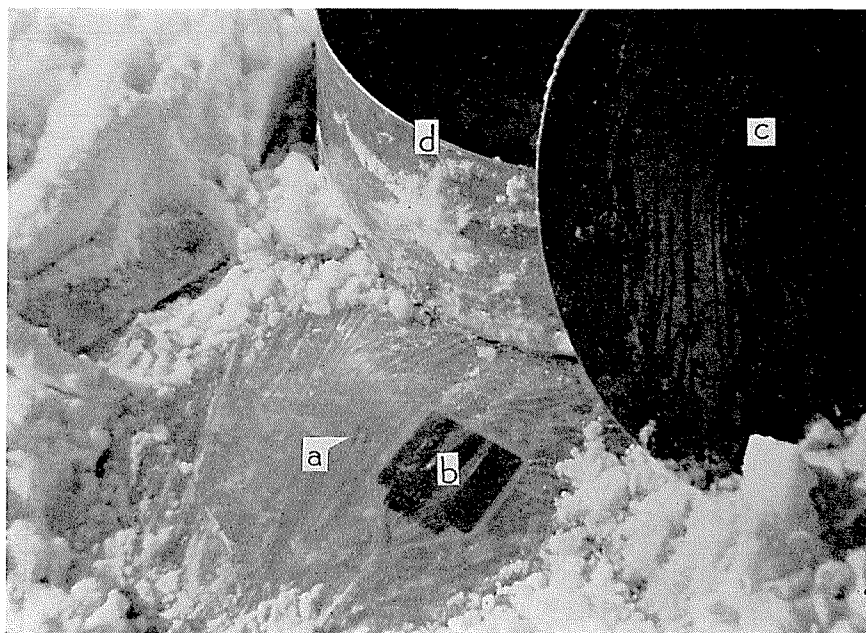
### III. 熱流量の測定

1964年には Beckman & Whitley の熱流量計を用いて熱流量の測定をおこなった。この熱流量計は輻射計のエレメント (T-200-1) で、14×14 cm 厚さ 1 mm のフェノール樹脂の板の中に、銀・コンスタンタンの熱電対列と銅・コンスタンタンの熱電対とを埋めこんだものである。フェノール樹脂の板は3層になっており、真中の層をはさむ熱電対列の熱起電力  $E$  (mV) とこの板を通過する熱量  $Q$  (cal/cm<sup>2</sup>·sec) とのあいだには

$$Q = 0.00145 F(\theta) \cdot E$$

の関係がある。 $F(\theta)$  は熱電対列の熱起電力やフェノール樹脂の熱伝導率が温度によって変わるのを、板の厚さの中央に埋めてある熱電対で測った温度  $\theta$  で補正するための係数である。この  $F(\theta)$  が既知なことはいうまでもない。この温度補正をおこなった場合の相対誤差は2%位といわれている。

第3図は測定個所の写真である。aには熱電対が鉛直に2 cm 間隔に埋めてある。その上に熱流量計 b を置く、この熱流量計は耐水構造になっていないので、端子部分はゴムテープで絶縁し、全体を薄いポリエチレンの袋に入れて空気を追いだし封をして使用した。測定時には



第3図 測定装置 (1964)

- a: 熱電対埋設箇所,    b: 熱流量計  
c: 真鍮円板,        d: 熱源容器

その上に真鍮円板 c と前述した熱源容器 d とをのせる。真鍮円板や熱源容器が氷層に凍りつくのを防ぐために、熱流量計の上には薄いポリエチレンが敷いてある。

熱流量計の起電力は氷温測定用の熱電対の起電力よりもはるかに大きいので、分圧器でおとして氷温の起電力範囲にそろえ前述の記録計に氷温と一緒に自記させた。

#### IV. 熱伝導率の鉛直分布

氷層中の温度の傾きは鉛直方向だけにあると考えることができる。いま、氷層の表面から鉛直下向きに  $z$  軸をとり、温度を  $\theta$ 、時間を  $t$  とするとき、熱伝導の微分方程式は

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (1)$$

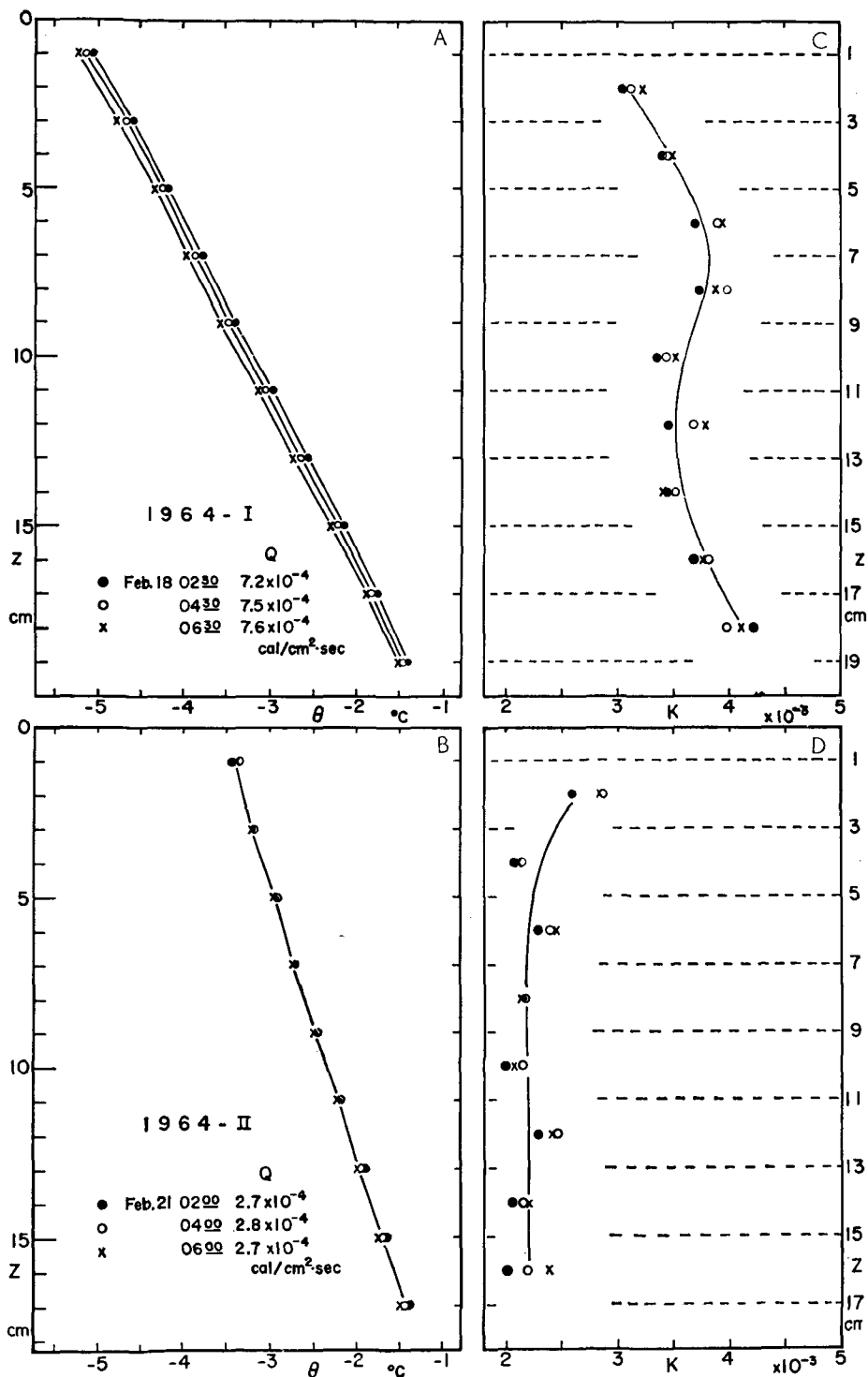
であらわされる。ここで、 $c$ 、 $\rho$ 、 $K$  は、それぞれ氷層の比熱、密度、熱伝導率である。

定常状態では  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$  であり、(1) 式は

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

となる。いま、氷層をいくつかの水平な層に分けて考えると

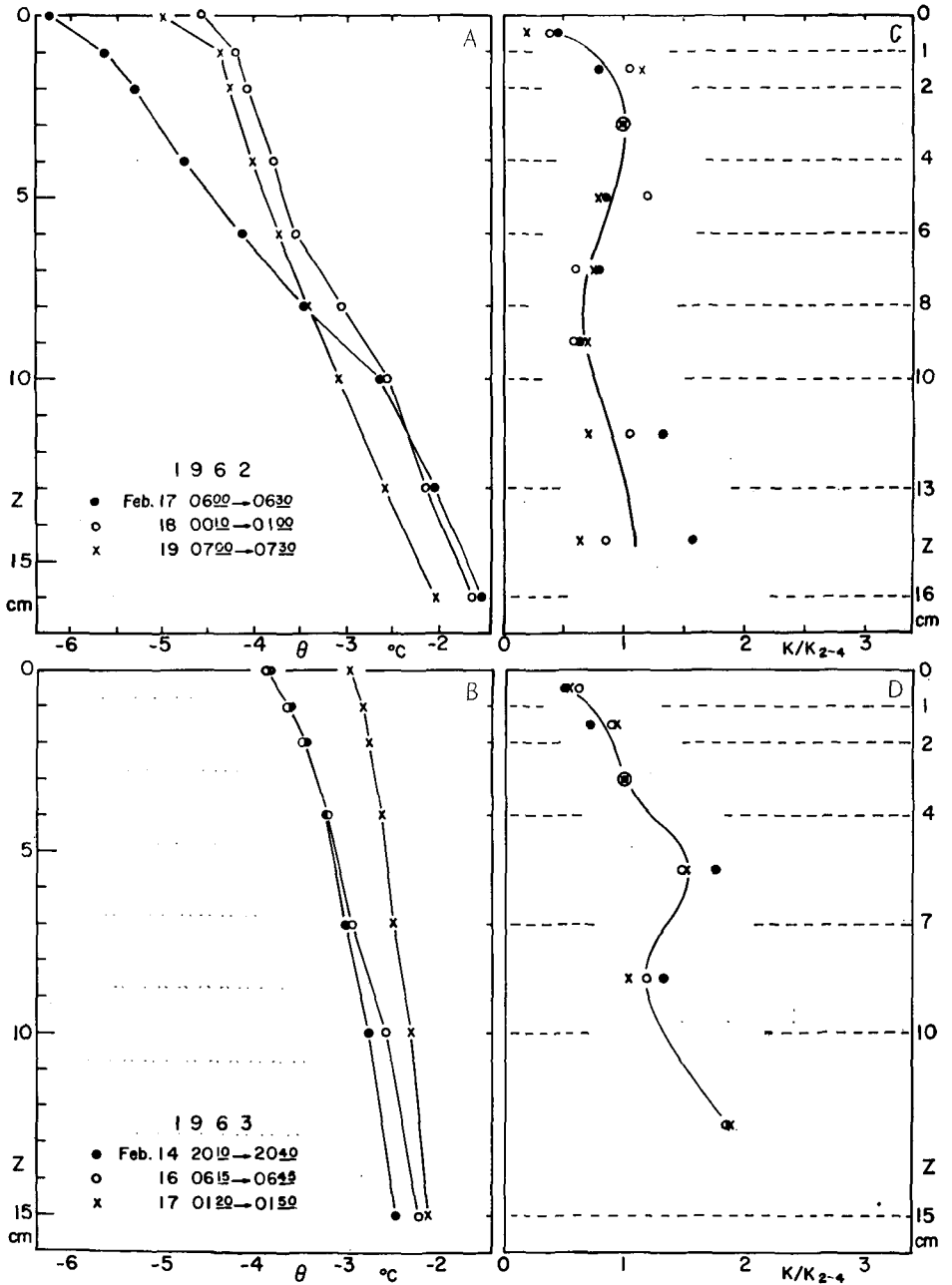
$$K_1 \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_1 = K_2 \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_2 = \dots = \text{const.} = Q \quad (3)$$



第4図 定常温度分布と熱伝導率の鉛直分布 (1964)

となつて、各層を流れる熱量は表面から流出する熱量、すなわち、熱流量計で測つた値  $Q$  に等しくなる。したがつて、定常温度分布をしている時の氷層中の各層の温度の傾きと表面での熱流量とから、各層ごとの熱伝導率の値を知ることができる。

1964年に測定した温度記録からほぼ定常的な温度分布をしていたと見なせる期間を選ん



第5図 定常温度分布と熱伝導率の相対比 (上: 1962, 下: 1963)

で、その時の鉛直温度分布と熱流量の値を示したのが第4図のAおよびBである。Aは12日に熱電対を埋めて18日に測った結果(1964-Iと呼ぶ)であり、Bは19日に熱電対を別の場所に埋めなおして21日に測った結果(1964-IIと呼ぶ)である。第4図のCおよびDは、それぞれAおよびBをもとにして求めた熱伝導率の鉛直分布である。実線でその大まかな傾向を示した。

熱伝導率は(3)式を使って計算したので、その相対誤差は

$$\left| \frac{\Delta K}{K} \right| \leq \frac{|\Delta z_j| + |\Delta z_i|}{|z_j - z_i|} + \frac{|\Delta \theta_j| + |\Delta \theta_i|}{|\theta_j - \theta_i|} + \left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| \quad (4)$$

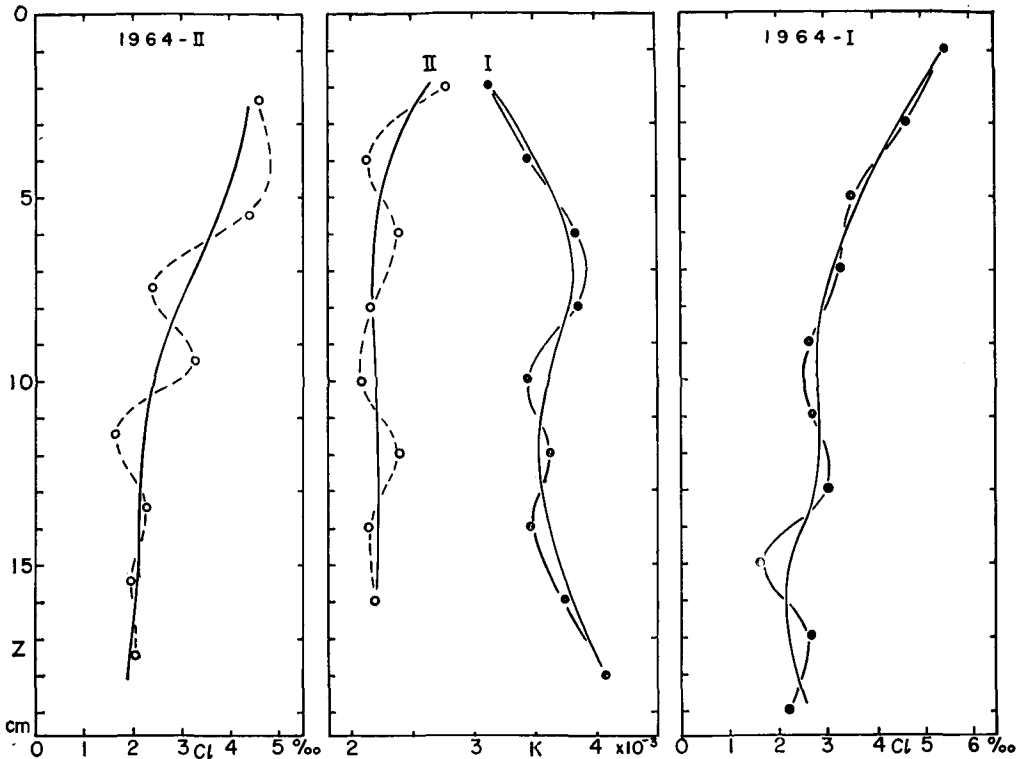
である。それぞれの熱電対の深さの誤差は $\pm 0.5$  mm程度と考えられるので、右辺第1項の深さに関する相対誤差はおよそ $\frac{1}{20}$ である。各層内の温度の傾きは記録紙上で $\frac{1}{2}$  mm目盛の物指しをあてて読取った値で計算し、最後に温度に換算して求めた。記録紙上の読みによる温度に関する相対誤差は、2 cm間の温度差が最も少ない1964-IIの1~3 cm層の場合でも $\frac{1}{30}$ 程度であった。また、熱流量の相対誤差は前述のようにおよそ $\frac{1}{50}$ とみつめることができる。したがって、熱伝導率の相対誤差は、最も大きくなる可能性のある1964-IIの1~3 cm層においても10%程度を考えればよいことになる。この相対誤差は熱電対を1本おきにとって4 cm間隔の温度の傾きを用いれば数%以下になる。第4図のCとDとでは熱伝導率の値がこの相対誤差を越えて大きく違っている。このことについては次節で考察をおこなう。

また、(3)式で熱流量の値 $Q$ が未知であっても、定常的な鉛直温度分布からそれぞれの層の温度の傾きを読取れば、各層の熱伝導率の比を求めることができる。第5図のAおよびBはそれぞれ1962、1963年のほぼ定常的と考えられる鉛直温度分布である。このA、Bをもとにして熱伝導率の相対比を求めたのが第5図のCおよびDである。いずれも相対比の基準として2~4 cm層を用いた。

第4図のDを除く第4図のC、第5図のCおよびDには熱伝導率の鉛直変化が認められた。したがって、“薄い一冬氷”は熱的には不均質な物質として取扱わなければならないことになる。

## V. 結果の考察

第6図は1964年のIおよびIIの氷層の塩素量を測った結果である。右左の図はそれぞれIおよびIIの氷の塩素量の鉛直分布を示したものであり、中央は前節で求めた熱伝導率の鉛直分布である。図には、全体として塩素量が増すにつれて熱伝導率が小さくなる傾向が認められ氷層の各部分についてもこのような対応があるように思われる。この傾向は海氷の独特な構造によって次のように説明される。すなわち、海氷は純氷の中に濃い塩水(ブライン)を閉じこめた構造をしており、ブラインの熱伝導率は純氷の値よりも小さいので、ブライン内での対流などによる熱の移動がないとすれば、海氷としての熱伝導率はブラインの量が増すにつれて小さくなる。ブラインの量は塩分量と温度との関数であり、氷層中の塩分が多いほど、また、氷層の温度が高いほど多くなる。したがって、海氷全体の熱伝導率は塩分量が多いほど、あるいは温度が高いほど小さい値をとることになる。



第6図 熱伝導率(中央)と塩素量(右: I, 左: II)の鉛直分布

北氷洋の厚い海水で測られた熱伝導率の表面近くの値を引用すると、Malmgren<sup>1)</sup>の測定値は表面で  $1.7 \times 10^{-3}$  (cal/cm<sup>2</sup>·sec·°C)、25 cm の深さで  $3.3 \times 10^{-3}$ 、75 cm で  $4.5 \times 10^{-3}$  であり、Ипатов<sup>2)</sup>の測定値は0~25 cm 層で  $4.4 \times 10^{-3}$ 、25~50 cm 層で  $5.7 \times 10^{-3}$  である。また、Назинцев<sup>3)</sup>の論文にあるソ連の漂流ステーションСП-5で測定された多冬極氷の熱伝導率は表面近くで  $5 \sim 6 \times 10^{-3}$  という値を示している。

Ипатов が熱伝導率を測定した厚い一冬氷の塩分量は表面で1.6%、25 cm の深さで1.0%、50~100 cm ではほぼ1.3%であった。第6図の塩素量の値2~6‰は塩分量に換算すると4~11%となり、Ипатов の測った厚い一冬氷の塩分量が筆者の測った薄い一冬氷の塩分量のおよそ数分の一であることがわかる。ところで、このように海水中の塩分が時間と共に次第に減少し、古い海水ほど塩分量が少なくなることはかなり以前から知られている<sup>1)</sup>。したがって、気泡の量がほぼ等しく測定温度も同じならば、海水の熱伝導率は古い海水ほど大きな値をとるものと考えられる。測定した薄い一冬氷の熱伝導率と引用した北氷洋の厚い海水の値には、このような関係があらわれているように思われる。

氷層の温度の測定は氷層に穴をあけて熱電対を埋めておこなうために自然状態を乱すことは避けられず、熱電対をできるだけもとの氷層に接触させて凍りつかせるように心がけたが、得られた熱伝導率は、1964年のIとIIとではかなり違った。この熱電対を埋めるための小さ

な穴は1日程度でふさがるけれども、その速い凍結のためにブラインを多く含んでしまうと考えられる。このようなブラインは次第に脱落して周囲の氷の状態に近づくものと思われるがある程度まで平衡するには若干の日時を要するのかも知れない。それぞれの氷の熱伝導率はIでは熱電対を埋めた6日後に測った値であり、IIでは別の穴に埋めなおしてから2日後の値である。また、穴の中にできる氷は周囲の氷からの塞がりかたや氷の切り屑の入りかたなどで熱的性質がいろいろと変ることも考えられる。これらのことが影響してI、IIの氷の熱伝導率に相違が生じたと考えられるが、このような点については今後検討したいと思っている。

測定にあたっては、低温科学研究所海氷研究グループの諸氏の御指導と御協力を頂いた。また、現地での観測には、紋別市漁業協同組合、北海道開発局紋別港湾修築事業所、紋別市役所から種々の御便宜を頂いた。厚く感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) Malmgren, F. 1927 On the properties of sea ice. The Norwegian North Polar Expedition with the "Maud" 1918-1925. Sci. Res. **1**, 5, 67 pp.
- 2) Ипатов, Д. С. 1961 Результаты вычисления теплопроводности морского льда. Проб. Аркт. и Антаркт. **9**, 79-82.
- 3) Назинцев, Ю. Л. 1964 Некоторые данные к расчету тепловых свойств морского льда. Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского Института, **267**, 31-47.
- 4) 田畑忠司・小野延雄 1957 海氷の構造について. 低温科学, 物理篇, **16**, 197-210.
- 5) 田畑忠司・小野延雄 1962 種々の氷の結晶主軸方向の分布の測定. 低温科学, 物理篇, **20**, 199-214.

#### Summary

In temperate climate, the thermal properties of young sea ice are relatively strongly dependent upon salinity, structure, temperature, and time, in comparison with those of thick winter ice in polar regions.

In February of 1962, '63, and '64, the thermal conductivity of young winter ice (20-30 cm thick) was studied at Monbetsu harbour, on the Okhotsk Sea coast of Hokkaido. The temperature of the ice cover was measured annually, and, in 1964, the heat flow at the ice surface was measured. The methods used are illustrated in Figs. 1 and 3. To obtain the stationary temperature distribution within the ice cover, the temperature of the ice cover was artificially controlled with warm and cold tubs (Figs. 1-a, 3-d). A typical example of the results obtained is shown in Fig. 2. The heat flow at the surface was measured with a Beckman & Whitley Heat Flow Transducer (Fig. 3-b).

The thermal conductivity of the ice cover may be calculated from equation (3), using the stationary vertical distribution of ice temperature and the heat flow at the surface (Figs. 4, A and B). Vertical distributions of thermal conductivity determined from the data given in Figs. 4, A and B are shown in Figs. 4, C and D.

From the stationary temperature profiles of Figs. 5, A (1962) and B (1963), relative

values for thermal conductivity were computed, and are shown in Figs. 5, C and D.

As may be seen from these figures, the thermal conductivity of these ice covers changes with depth, or, in other words, young winter ice is non-homogeneous with respect to thermal properties.

Profiles of thermal conductivity and chlorine content are shown in Fig. 6. As is shown in the figure, thermal conductivity has a tendency to decrease with increasing chlorine content.

Further investigation of the thermal properties of young winter ice is progress.