

北極海における海水観測 I

中村秀臣*

防災科学技術研究所

中村 亘**・佐々木保徳**

海洋科学技術センター

Sea Ice Observation in the Arctic Ocean (I)

By

Hideomi Nakamura

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,

and

Tohru Nakamura, Yasunori Sasaki

Japan Marine Science and Technology Center

Abstract

Thickness distributions and thermal conductivity of sea ice were measured in the Arctic Ocean north to Svalbard Islands in International Arctic Ocean Expedition-91.

The measurement of sea ice thickness was carried out putting a measuring rule quickly on the fractured surface of sea ice which was broken by bows of ice breaker. A fishing rod was used as the rule.

The ice thickness was about 0.7-2m in the marginal of the Arctic ice. The ice becomes thicker toward the maximum thickness of 3m with altitude. Our observations were about one half of those measured by submarines.

2m long ice core was supplied for thermal conductivity measurement which was taken at Lat. 84° 49' N and Long. 40° 03' E. The thermal conductivity increased with depth, and was by 20-50% lower than the theoretical value. The mean thermal conductivity over the entire core was 0.554W/m.K.

Keywords :Arctic Ocean, sea ice, ice thickness, thermal conductivity, heat flux

キーワード:北極海, 海水, 氷厚, 熱伝導率, 熱フラックス

*気圏・水圏地球科学技術研究部 **海洋研究部

1. はじめに

北極海における熱交換システムを明らかにすることは、地球規模での気候変動予測を行う上で極めて重要である。北極海は赤道付近から大気および海水で北半球に輸送される熱エネルギーの最終吸収帯として重要な役割を果たしているのにもかかわらず、常に積雪に覆われている南極大陸とは異なり、夏季には水路が至るところを走り、氷盤の上には融雪水が集まって出来るメルトポンドが数多く生じ水面をのぞかせ、しかも海水面が時として陸域からの泥寧で覆われるといった複雑さがある。このため年間を通じての海面での熱収支を見積ることは容易ではないし、また観測データも少ない。北極海を対象とした観測研究は最近とみに重要視されており、外国ではこの種の観測を積極的に推進する傾向が見られるものの、わが国での観測例は非常に少なく、この分野での研究は立ち遅れているといえよう。

北極海での海面熱交換量を正確に評価するには、気温・風速など北極域の気象状況を把握する他に、海水域の面積や海水の厚さ、海水と海水が混在する時の熱交換量、海水の熱伝導率など海水の物理的・地球物理的特性を知る必要があるが、北極海におけるこれらの観測は、潜水艦に搭載した音響探査装置で、下から海水の水中部分の厚さ（以後喫水下水厚と呼ぶ）が測定されている以外、あまりなされていないのが実状である。

筆者達は1991年8月、国際北極海観測-91（International Arctic Ocean Expedition-91）に参加する機会を得て、米国の砕氷船ポーラースターによって北極海の海水観測を実施した。その中で行った海水の厚さ分布、および海水の熱伝導率の測定について報告する。

2. 観測船の航路および観測場所

写真1は観測に使用したポーラースター号で、米国沿岸警備隊に所属する1万2千トンの砕氷船である。この船に米国、カナダ、ドイツおよび日本の研究者計21名が乗り組み、海洋観測、海水観測がそれぞれのテーマのもとに実施された。

観測船は8月11日にノルウェーのトロムセを出航して北北東に進み、図1に示すように、スバルバル諸島の東側を通過した後、ほぼ北向きに進路を変えて北上した。8月14日早朝、北緯80°40'、東経29°28'の地点から海水域に入り、砕氷を行いながらさらに北上し、8月25日夕刻、北緯85°00'、東経39°01'に到達した。計画では北極点を通過してカナダ沖まで行く予定であったが、19日に起きた船のシャフトシールの故障のため、ここを最北到達点としてUターンし、東経50°線に沿って南下し、9月4日朝、北緯80°41'、東経38°19'の地点で海水域を抜け出て11日にノルウェーのベルゲンに帰港した。海水の厚さの測定は海水域に入った8月14日朝から開始し、最北地点に到達した8月25日まで行なった。また、熱伝導

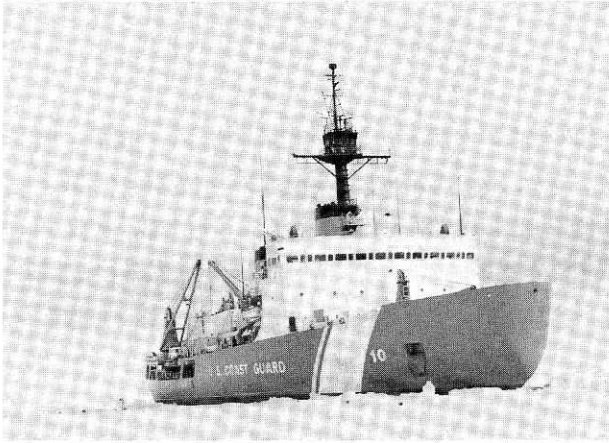


写真1 観測に使用した米国の砕氷船ポーラスター号.

Photo 1 American Ice Breaker "Polar Star" used in the Arctic Ocean Expedition.

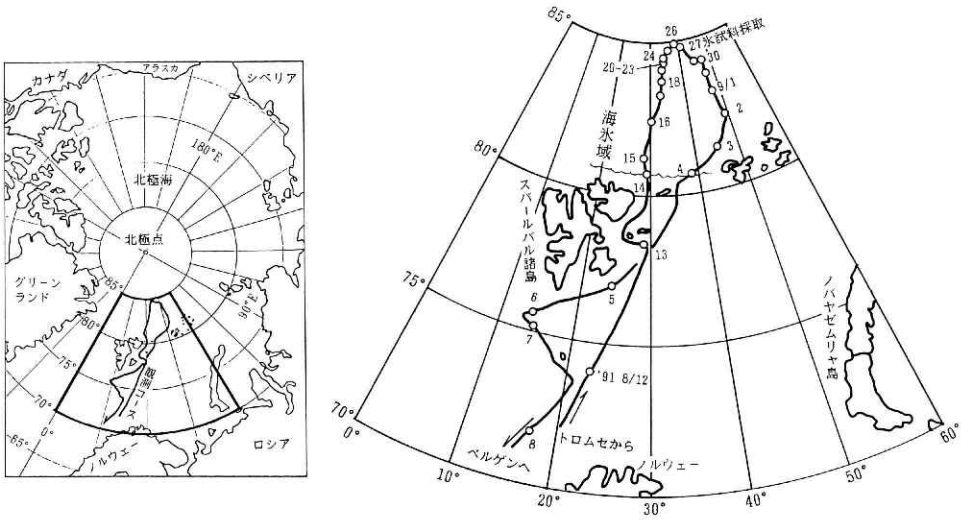


図1 観測船の調査コース。ルート沿いの添え字は日付。8月14日に海水域に入り、9月4日に抜け出した。

Fig.1 Track of ice breaker "Polar Star". The ship got into ice sea on Aug. 14 and got out on Sept. 4.

率の測定は、8月27日に北緯84°49′，東経40°3′の地点で採取した氷について行った。なお船の位置はIAOE-91 Navigation Data (Woods Hole Oceanographic Institution,1991) によった。

3. 海水の氷厚測定

3.1 測定方法

海水が砕氷船の船先で割られた時生ずる破断面はほとんどの場合、海水底面および海水表面とほぼ直角をなす。また、割れて出来た氷塊はたいていの場合写真2に示す様に、その破断面を上方に見せながら船べりに沿って通り過ぎる。そこで、氷塊が舷側を通り過ぎる間に、氷塊の本来の表面と本来の底面との間の間隔を素早く実測して氷厚とした。

両面の間隔の測定は釣竿を用いて次の様にして行なった(図2参照)。まず、リール竿の

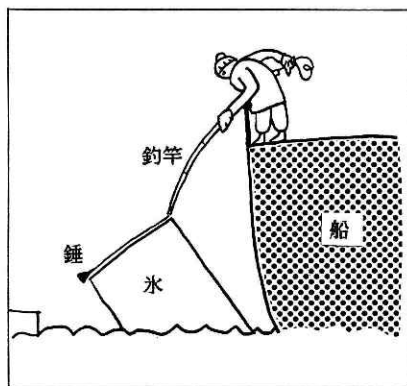


図2 釣竿を用いた氷厚測定の様子。

Fig. 2 View of ice thickness measurement using fishing rods.

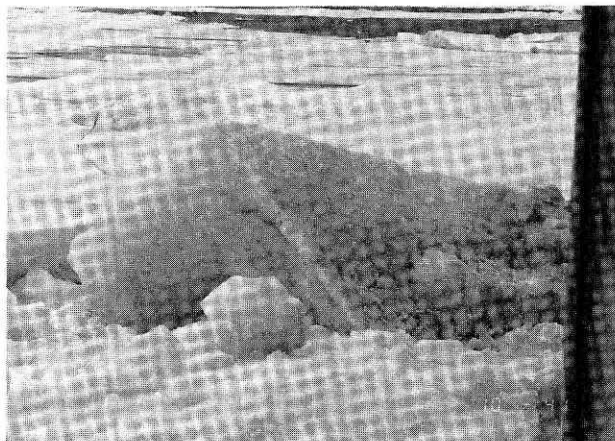


写真2 海水が砕氷船のへさきで割られる様子。破断面を上方に向けながら舷側を通過して行く。

Photo 2 View of sea ices broken by bows of ice breaker. They passed by the ship side showing their fractured surface upwards.

様に糸の長さが自由に調節できる釣竿を用意する。走行中の船上から、通過中の氷塊の底面と破断面が交差する稜線上の適当な所に釣り糸先端のおもりを、氷塊の表面と破断面とが交差する稜線上で、かつ、おもりの直上に当たると思われる点に釣竿の先端を当てがい（またはその逆）、両者の間でたるみが無い様に、手元で素早く糸の長さを調節する。釣糸の長さが決まるとそのまま船上に引き込み、メジャーを当てて、おもりと釣竿先端間の釣糸の長さ、すなわち氷厚を測定する。今回の測定ではリール竿は使用せず、写真3に示すように、糸は竿の中を通し、手前に出て来た糸を手繰ったり緩めたりして長さを調節した。釣竿の長さは約6mである。

停船中の測定では、海水の底面が水面下にあるのでその深さが分かりにくく、上記の方法が採れないので、おもりの代わりに、布の部分を取り去って骨だけになった傘を開いて逆さにぶら下げて、それを一旦充分深くまで沈めた後、ゆっくりと海水の縁に沿って引き上げ、引っかかった所を底面の位置とし、竿先端を氷塊の上面に当てがって両者間の測定を行なった。いずれの場合も測定は氷丘など凹凸の激しい所は避け、氷盤の厚さがほぼ均一な所を選んで行った。

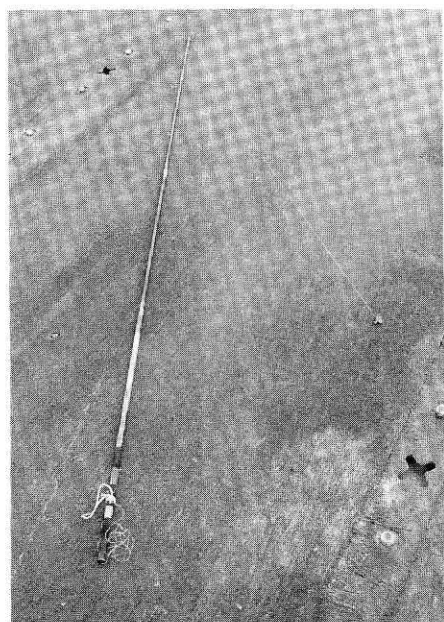


写真3 氷厚測定に用いた釣竿。糸は竿の中を通り、手元に出て来ている。手元で糸の長さを調節する。

Photo 3 Fishing rods to measure sea ice thickness. The thickness measurement was achieved by putting the lead weight on the lower edge and the top of rods on the upper edge of the fracture of sea ice quickly.

3.2 測定結果

測定は58個の氷について行った。観測コースが経線にほぼ平行であったから、氷厚を緯度別に整理して図3に示す。海水域に入った北緯80度40分が、この時期、この場所での海水域の南縁であり、そこでの氷厚は0.7m～2m程度であった。海水域に入ると、数百m以上の氷盤ばかりになり、それぞれの境目に水路が見られるという状態が続いた。氷厚は緯度とともに

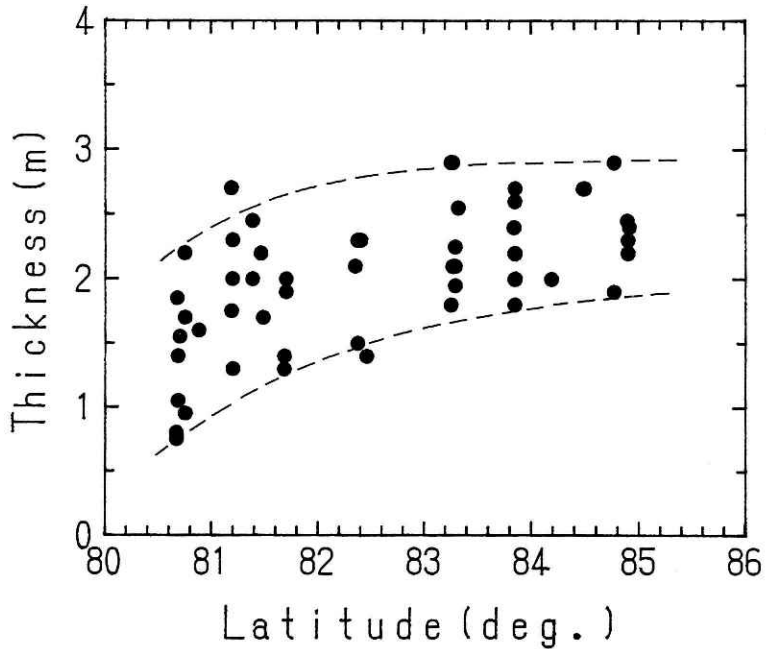


図3 東経30度線沿いに見た氷厚分布. 緯度が高くなるに従って氷厚が増加しているが, 増加の割合は小さくなっている.
Fig.3 Sea ice thickness distribution along longitude 30 degrees E. The thickness increases with latitude, but the increasing rate gradually becomes small.

に増加し, 北緯82度近くでは1.5m~2.5m, 85度付近では2~3mになっているが, 増加の割合は小さくなっている. 特に上限の値はほぼ一定値の3mを示している.

図3からは, 無氷域からいきなり氷厚70~80cm以上の海水域に入ったように見えるが, 実際には, 8月14日6時半頃デッキに出てみて, 海水域に入っているのに気が付き, その時の氷厚が70~80cmであったというのが正しい. したがって, その直前の海水状況がどうであったかは観察していなかったため, 氷厚が徐々に厚くなって来たのかどうかは分からない. ただし, 停船地点の前方の海は氷盤で占められているのに対し, 船尾の方は開水面が広がっており, 海水は所々に散見されるのみであったので, そこが海水域と無氷域との境界としてよいであろう.

海水域の縁の氷厚が70~80cmで, それより薄い氷が見られなかったのは, ①厚さが薄くなればなるほど氷は細かく割れて, 海流や風によって容易に移動しやすくなり, 海水域から分離されやすいと考えられる事, ②そのような単氷塊は比表面積が大きくなり, 海水などによって速やかに融解し消滅してしまうと考えられる事などの理由によるものと思われる. 無氷域と海水域の境界で海水が小さく分割されている例を写真4に示す. これは, 9月4日に



写真4 海水域を抜け出る時の海水の様子。直径10m程度の小さな板氷ばかりになる。

Photo 4 Ice floe size decreased getting near to the marginal of the Arctic ice (in return cruise).

海水域から抜け出る時の海水の様子で、それまで見られた大きな氷盤とは異なり、直径10m程度の比較的小さな氷塊”板氷”が多数見られた。この氷塊群を通り抜けるのに1時間程度要したので、その時の船速から氷塊群の南北方向の幅を計算すると約4 kmと見積られた。

1982年までに潜水艦によって得られた喫水下氷厚データから、Bourke and Garrett(1987)が作成した平均喫水下氷厚マップによると、北緯85東経39付近では、7月中旬から10月中旬の”夏季”の平均値は4 mとなっているが、筆者が同所で8月25日に行った測定では、氷厚は2～3 mであった。喫水下氷厚は氷厚の80～95%なので(Bourke and Garrett,1987)、4 mの喫水下氷厚を氷厚に換算すると4.2～5 mになる。つまり、今回の測定値は潜水艦で得られた測定値の半分程度に過ぎないと云うことになる。両者の測定値の間にこの様な大きな差が生じた原因としては次の事が考えられる。すなわち、①砕氷船が氷の薄い所を選んで通った、②測定法の違い、③観測年の違いなどである。

①については、船の円滑な走行のため、出来ることなら水路を利用して進もうとするので、どちらかと云えば氷盤の中央というよりも縁に近い所を走行したかも知れない。ただし、氷盤の厚さが縁や中央など場所によってどう変化するかについては測定していないので、縁を走行した事がどの程度測定値に影響するかは不明である。

また②関してはその測定精度を見てみると、潜水艦での測定は±6 cmの精度でなされている。一方筆者の測定では、同一の氷について何度も測定を繰り返すという訳には行かなかったので、今回の測定法の再現性を評価することは出来ず、その測定精度は不明であるが、直接測定でもあるし、また、釣り糸を氷に当てたときの様子から、10%程度には納まっているものと考えている。これらの事から、測定法は違ってても1 mを越すような差は生じない筈と

考える。なお、測定に際しては、都合よく破断面を上方に向けた氷についてはすべて測定対象とし、あまりに厚いために測定対象から除外したケースはない。今回測定した中で最も厚かったのは3.7mであった。ただし、このケースは氷丘の様に盛り上がった氷であったため図3からは除外してある。

さらに③については、北極海では場所によって喫水下水厚が減少しているという報告(Wadhams,1990)や、海水面積が減少しつつあるとの指摘(Gloersen and Campbell,1991)があることから、もしそうだとすれば重要な知見となる。

4. 海氷の熱伝導率の測定

4.1 試料採取および測定方法

測定のために直径7.5cmのサンプラーで、厚さ約2mの平坦な海水から鉛直に氷の底までのコアを採取した。この表面から20cmの所を最初として、深さ方向に40cm毎の合計5箇所について、厚さ2.4cm直径5cmの円板状の試料を切り出してその熱伝導率を測定した。測定は各箇所について2回ずつ行なったが、それぞれの1回目の測定は、試料採取後3日目から3日間掛けて船上で行ない、2回目は残った試料を日本に持ち帰って、1回目の5個の試料にそれぞれ隣接する氷を対象として行った。したがって、1回目と2回目ではその測定深さに3cm程度の差がある。2回目の測定は、コア採取後58日目から3日間掛けて行なった。

1回目の測定は約 -10°C の低温室内で、また2回目は約 -7°C の低温室内で行った。いずれの場合も、氷試料を熱伝導率計にセットしてから2~3時間放置し、熱伝導率計内の温度分布が定常状態になるのを待って、熱伝導率が既知の標準板および氷試料の上下面間の温度差から、氷試料の側方への熱流を考慮して熱伝導率を求めた。

4.2 熱伝導率計

使用した熱伝導率計の概略を図4に示す。この装置は恒温装置、標準板、試験体(氷試料)をセットするための空間、低温室内の気温変動が直接試料に伝わらないようにするための真鍮ブロック、およびこれらを包む断熱材からなる。本装置は標準板と試験体の境界面で上部と下部に周囲の断熱材ごと分離できるようになっており、下部に氷試料を収めた後両者を結合させ、その後で上部に氷と水を入れて恒温を保つ仕組みになっている。測定はマイナス温度の低温室で行ったから、相対的に恒温装置が高温側、真鍮ブロックが低温側になる。標準板には筒中工業株式会社製の厚さ5mmの硬質塩化ビニール板(商品名:サンロイド、熱伝導率: $0.151\text{W/m}\cdot\text{K}$)を使用した。氷試料は内径50mmの鉄パイプを加工して作ったサンプラーとかんなを用いて厚い円板状に整形した。

断熱材は内外の2層に分かれており、内側の断熱材は配管材を保温するための厚味のある

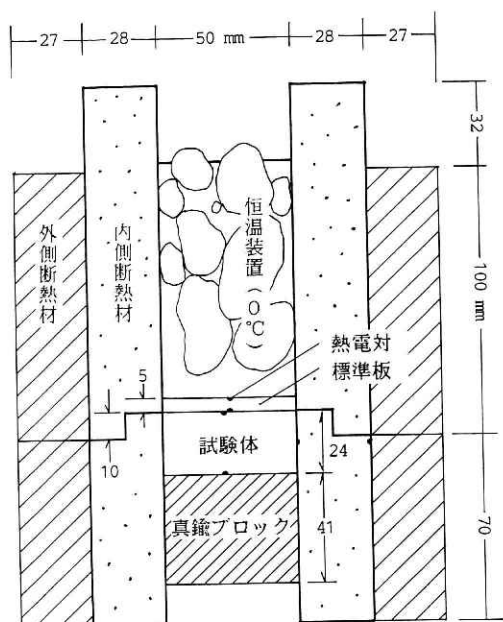


図 4 使用した熱伝導率計。標準板と試験体が接触する面を境に上下に分割できる。

Fig.4 Device to measure the thermal conductivity of sea ice. The device is composed of two parts to set ice sample into lower part.

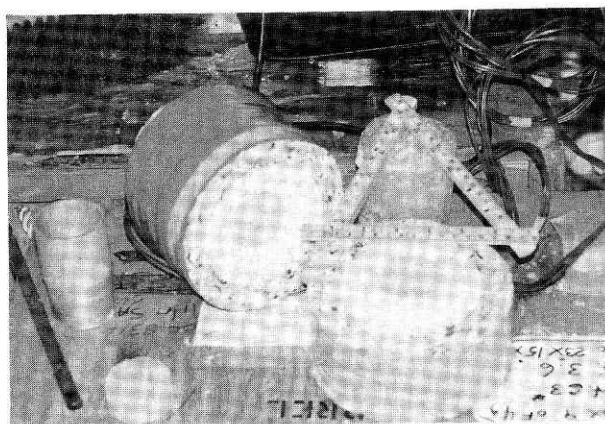


写真 5 熱伝導率計。上部と下部を分離した時の様子。実験では、下部に氷試料を入れた後両者を結合し、上部に氷と水を入れて高温側恒温装置とする。

Photo 5 Device for thermal conductivity measurement. The two parts are combined after setting ice specimen into the lower part.

円筒状の発泡スチロール製、外側の断熱材はウレタンフォーム製である。内側断熱材は結合の際、下部を上部の内側に 1 cm 程差し込む様になっており、このため気密性がよく、熱の側方への流出を抑制することが期待できる。また、氷試料を所定の場所にセットする時は、内側断熱材の僅かな弾力性のため密着性を保ったまま押し込むことが出来た。

熱流量を測定するため、標準板および氷試料のそれぞれの上表面と下表面と、内側断熱材の内壁面と外壁面とにそれぞれ直径 0.03mm の熱電対を取り付けた。写真 5 に熱伝導率計を分割し

た時の様子を示す。

4.3 熱伝導率の計算法

図4に示したような熱伝導率計において、各部の温度が定常状態を示している時には、熱流量は次のような関係にある。

$$\begin{aligned} (\text{標準板を通過する熱流量}Q_s) &= (\text{試験体を通過する熱流量}Q_i) \\ &+ (\text{試験体側面から側方への熱流量}Q_r) \end{aligned} \quad (1)$$

Q_s および Q_i は(2), (3)式で表される。

$$Q_s = -K_s \cdot S (T_{s2} - T_{s1}) / Z_s \quad (2)$$

$$Q_i = -K_i \cdot S (T_{i2} - T_{i1}) / Z_i \quad (3)$$

ここで

Q_s, Q_i : 標準板および試験体を通過する熱流量 (W)

K_s, K_i : 標準板および試験体の熱伝導率 (W/m.K, $K_s=0.151$)

S : 標準板と試験体が接する面の面積 ($1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)

T_{s1}, T_{s2} : 標準板の上面と下面の温度 (K)

T_{i1}, T_{i2} : 試験体の上面と下面の温度 (K)

Z_s, Z_i : 標準板及び試験体の厚さ (m, $Z_s=0.005, Z_i=0.024$)

である。

また、試験体側面から側方への熱流量 Q_r は(4)式で表される。

$$Q_r = -2\pi K_r Z_i (T_{r2} - T_{r1}) / \log (R_2 / R_1) \quad (4)$$

ここで、

Q_r : 試験体側面から側方への熱流量 (W)

K_r : 内側断熱材の熱伝導率 ($3.50 \times 10^{-2} \text{ W/m.K}$)

T_{r1}, T_{r2} : 内側断熱材の内壁および外壁の温度 (K)

R_1, R_2 : 内側断熱材の内半径, 外半径 (m, $R_1=2.5 \times 10^{-2}, R_2=5.3 \times 10^{-2}$) である。

(1)~(4)式に測定結果を代入すれば未知数である試験体の熱伝導率 K_i が求まる。

表 1 海水の熱伝導率、塩分濃度は使用した氷コアのごく近傍で採取した別の氷コアについての測定値。
Table 1 Thermal conductivity of sea ice in the Arctic Ocean.

深さ (m)	1 回目測定 (試料採取後 3 ~ 5 日)				2 回目測定 (試料採取後 5 8 ~ 6 0 日)				隣接するコアの 塩分濃度 (%)
	密度 (kg/m ³)		熱伝導率 (W/m·K)		密度 (kg/m ³)		熱伝導率 (W/m·K)		
	試料温度 (K)	試料温度 (°C)	試料温度 (K)	試料温度 (°C)	試料温度 (K)	試料温度 (°C)	試料温度 (K)	試料温度 (°C)	
0.2	820	267.1 (-6.1°C)	0.89	269.2 (-4.0°C)	800	269.2 (-4.0°C)	1.25	0.10	
0.6	910	267.0 (-6.2)	1.18	269.7 (-3.5)	890	269.7 (-3.5)	1.64	0.10	
1.0	910	267.7 (-5.5)	1.23	269.1 (-4.1)	920	269.1 (-4.1)	1.61	0.15	
1.4	910	268.4 (-4.8)	1.06	271.4 (-1.8)	890	271.4 (-1.8)	1.36	0.65	
1.8	910	268.3 (-4.9)	1.28	271.4 (-1.8)	920	271.4 (-1.8)	1.90	1.45	

4.4 測定結果

測定結果を表 1 および図 5 に示す。0.2m の深さの試料はざらめ雪が再凍結して出来た氷で白っぽく、密度が 800-820Kg/m³ と比較的軽かったが、それ以深ではいずれの密度も 900Kg/m³ 前後であり、透明であった。ただし、1.0m 深の氷では 1 mm 程度の気泡が幾つかあったし、1.4 ~ 1.8 m 深の氷では 0.1mm オーダーの小さな気泡が少し含まれていた。測定時の試料温度は 1 回目が約 -5 ~ -6 °C、2 回目が約 -2 ~ -4 °C であり、2 回目の方が 2 ~ 3 °C 高い。試料の塩分濃度は測定しなかったため、この氷試料の採取地点から数 m 離れた所の氷コアについて Tucker 達が測定した塩分濃度 (Tucker et al., 1991) を表 1 右端に示す。

熱伝導率 K_i の測定値を、氷温、塩分濃度および密度から熱伝導率を求める理論計算 (小野, 1968) による結果と比較してみると、測定値は理論値の 5 ~ 8 割程度であった。測定誤差が生じる原因には、標準板や氷試料の上面下面の表面温度、および内側断熱材の内外壁の表面温度が正確に測定されたかどうかと云う点があるが、氷試料や内側断熱材の表面では熱電対の先端が物体に僅かながらめり込む様にセットしたので誤差は小さいものと考えられる。標準板については厚さが 5 mm と薄かった事もあるためそのようにはセットせず、表面に張り付けただけであったので、誤差が含まれているかも知れない。ただし、物体表面での温度跳躍現象を考えると、標準板をはさんだ温度差の真値は実測値より小さくなる筈であり、もしそうならば K_i はさらに小さくなるであ

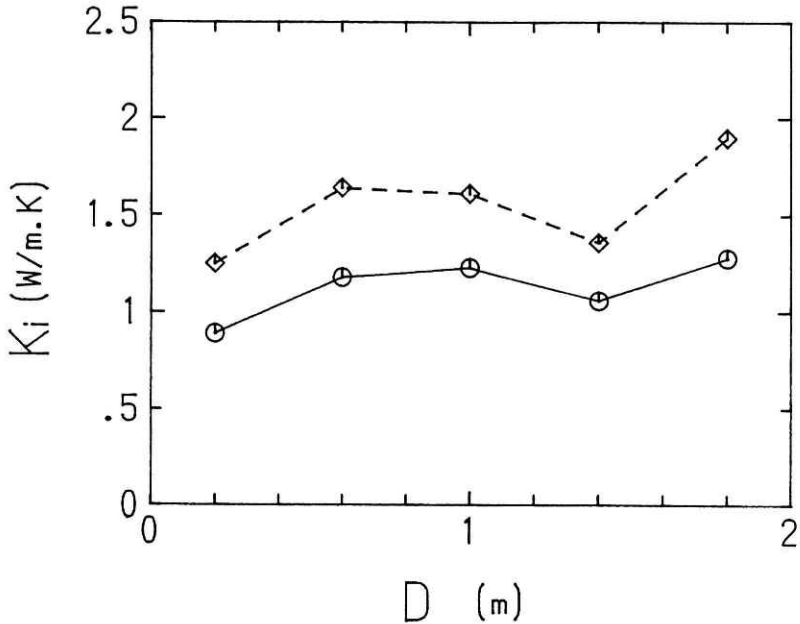


図5 深さDと熱伝導率 K_i の関係。○印：1回目の測定（コア採取後3日目～5日目），◇印：2回目の測定（58日目～60日目）。 K_i は深さとともに増加する傾向を示す。2回の測定値に差が見られるが、その原因はよく分からない。

Fig.5 Depth dependence of thermal conductivity. Top and bottom lines indicate the results of the measurement done 3 days and 58 days after the sampling, respectively.

ろう。

この他に標準板の熱伝導率が温度によって変化することも考えられるが、それについては未検討である。なお、小野（1966）が紋別港内の氷（氷温約 -2°C ，塩素量約2%）について求めた熱伝導率は 0.57W/m.K で、今回の測定値の半分以下となっているが、これは測定法の違いによるものであろう。

図5に示したように、2回の測定値間には $0.5\sim 0.6\text{W/m.K}$ 程度の差があり、1回目の測定より2回目の測定の方が大きくなっている。海水の熱伝導率は塩分濃度が小さいと大きいので、2回目の測定までにブラインが脱落して塩分濃度が小さくなった事も考えられるが、前述の理論式を用いて K_i の増加量を計算しても、この温度範囲でこの程度の塩分濃度では、たとえ全部のブラインが脱落してもほとんど差は出てこない。双方とも絶対値は別として変化傾向は似ているので、単なる測定誤差ではないと思われるが、その原因はよく分からない。

本測定に用いたような塩分濃度が小さい氷では、 -2°C 付近より低温側では熱伝導率は塩分濃度にほとんど影響されず、気泡量に大きく支配されるので（小野，1968），氷試料の密

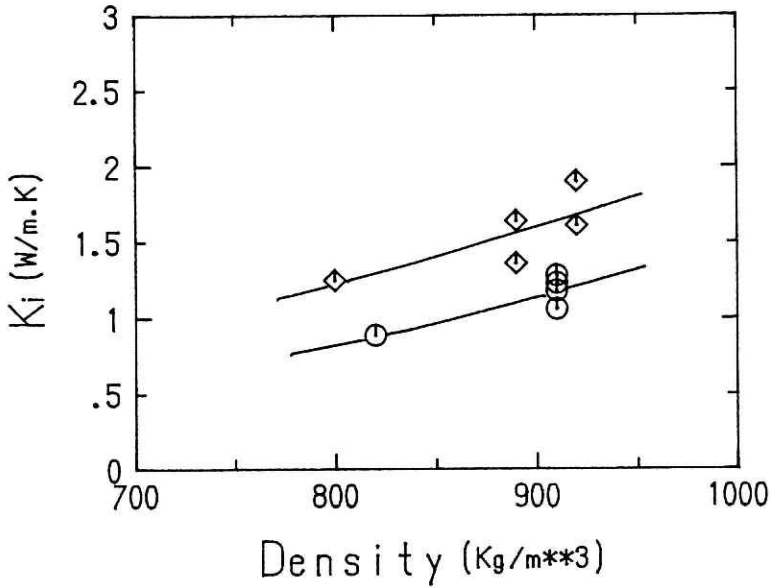


図6 氷の密度と熱伝導率の関係。記号は図4と同じ。用いた氷試料の温度範囲および塩分範囲では、熱伝導率が気泡量すなわち密度に大きく支配される事を裏付ける。

Fig.6 Dependence of thermal conductivity on ice density. Symbols are same as in Fig.4. This shows that the density is a predominant factor which affects on the thermal conductivity of low salinity ice at low temperature, as reported by One (1968).

度と熱伝導率 K_i との関係を見てみると図6の様になり、密度とともに K_i が増加しているのが分かる。

4.5 総合熱伝導率

図5に示したように、測定対象とした氷は熱伝導率が深さとともに変化しているので、これを各層厚が0.4mの5層からなる複合材と見なして、その総合熱伝導率を求める。複合材の熱伝導率 K_t は(5)式で表される。

$$K_t = (\sum (Z_i / K_i))^{-1} \quad (5)$$

ここで、

K_t : 総合熱伝導率 (W/m.K)

Z_i : 層厚 (0.4m)

K_i : 各層の熱伝導率 (W/m.K)

である。

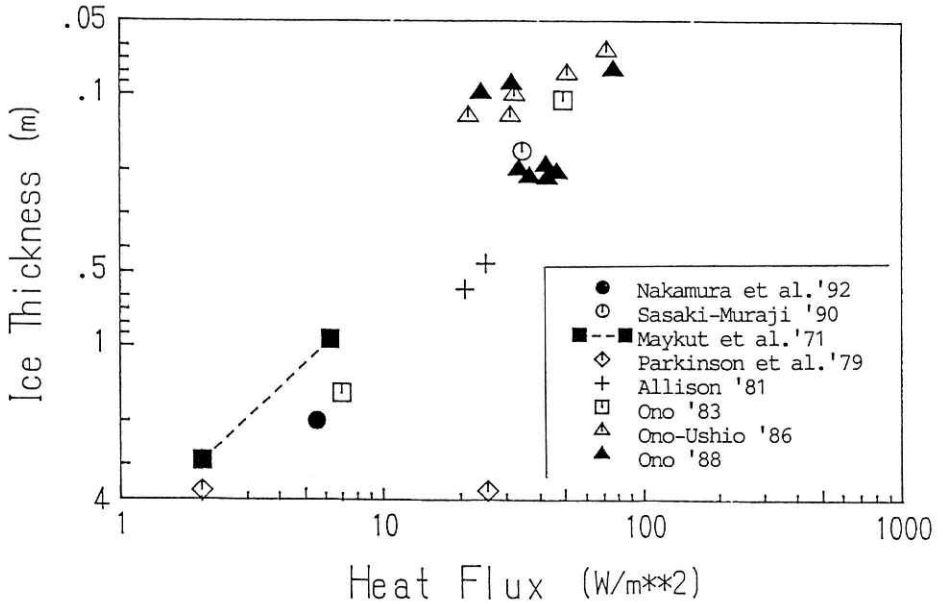


図7 海水を通して流れる熱流量. 小野 (1988) が作成した図から, 海水に関する部分を抜き出して描き直し, 新たに2例を追加した.

Fig.7 Heat flux through sea ice in the Arctic Ocean. This figure was originally drawn by Ono (1990).

(5)式に測定結果を代入すれば総合熱伝導率が求まる. 測定結果のうち, 採取から測定までの経過時間が短く変質の度がより小さいと思われる第1回目の測定値を用いて総合熱伝導率を計算すると, $K=0.554$ (W/m.K) となった.

冬季, 北極海の海水の表面と底面の間の温度差がどの程度になるか分からないが, 気象データマニュアル (中村他, 1988) によると, 北極海の1月の平均気温が $-10 \sim -30^{\circ}\text{C}$ 程度なので仮に 20°C とすると, この氷を通して上向きに流れる伝熱量は 5.54 (W/m²) となる. 氷厚と伝熱量との関係について, これまでに各研究者によって得られた測定結果を小野 (1990) が整理し作成した図中に, この値を加えると図7の様になり, 他の研究者の値とほぼ同じ値となった (図7には, 筆者の一人佐々木他 (1990) の測定値も加えた).

5. おわりに

北極海の海水観測を行い, 海水の氷厚分布および海水の熱伝導率の実測を行った. 現地調査の困難さのために観測データの少ない北極海で, 海水に関する種々の実測値を得る事が出

来た。当初計画したような、北極点を横断しての海水観測は出来得なかったが、今後機会があればこの様な現地観測を通してのデータの蓄積を図り、北極海での海気相互作用の実態を実測を通して明らかにして行きたいと考えている。

謝 辞

本観測は、Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) および米国沿岸警備隊の計らいによってなされた。WHOIからはこの他に観測船の位置データの提供を受けるとともに、同所の本庄博士からは観測に際して種々の配慮を賜った。さらに、CRRELのTucker博士達には氷コアの採取や塩分データの利用をお願いした。なお、ポーラスターの乗組員の方々には白熊からの護衛など氷上観測時の安全確保に細かい配慮を頂いた。また、新庄雪氷防災研究支所の佐藤篤司主任研究官および阿部修研究員からは有益な助言や協力を得た。ここに記すとともに深く謝意を表します。

本観測研究は防災科学技術研究所経常研究「北極海における海水生成機構に関する研究」および海洋科学技術センター長期プロジェクト研究「北太平洋・北極海域総合観測調査研究」の一環として行われた。

参考文献

- 1) Bourke, R. H. and Garrett, R. P. (1987): Sea ice thickness distribution in the Arctic Ocean. *Cold Regions Science and Technology*, 13, 259-280.
- 2) Gloersen, P. and Campbell, W. J. (1991): Recent Variations in Arctic and Antarctic sea-ice covers. *Nature*, 352, 33-36.
- 3) 中村繁・北村幸房 (1988): 理科年表読本 気象データマニュアル, 204pp.丸善株式会社.
- 4) 小野延雄 (1966): 海水の熱的性質の研究 III. 低温科学, A-24, 249-258.
- 5) 小野延雄 (1968): 海水の熱的性質の研究 IV. 低温科学, A-26, 329-349.
- 6) Ono, N. (1990): Thermal regimes of waters in cold regions. *IAHR Symposium on Ice 1990, Proceedings, Vol.3*, 49-58.
- 7) 佐々木保徳・村治能孝 (1990): 海水域における大気海洋間熱輸送の観測研究. 太平洋における大気・海洋変動と気候変動に関する国際共同研究, 110-122, 科学技術庁研究開発局.
- 8) Tucker, T., Gow, T. and Bosworth, H. (1991): *IAOE-91 CRREL ICE CORE DATA* (私信).
- 9) Woods Hole Oceanographic Institution (1991): *IAOE-91 Navigation Data* (私信).
- 10) Wadhams, P. (1990): Evidence for thinning of the Arctic ice cover north of Greenland. *Nature*, 345, 795-797. (1992年7月21日 原稿受理)