

北極海縁海の海水の構造と熱伝導率

佐々木保徳*¹ 中村 秀臣*² 畠山 清*¹
中村 亘*¹ 角田 晋也*¹

Comiso が海水のモデルを提案している。しかし、このモデルは、北極海の縁海の一つであるチュクチ海の海水に対しては十分ではない。というのは、この海域では最も頻繁に見られるのは真水氷だからである。そこで、著者らは、チュクチ海の海水モデルを提案するとともに熱伝導率についても報告する。海水は、構造的には大いなる多様性を示すが、それらは5つのカテゴリーに分類した。

海水は冠雪を伴っている。冠雪深度は1~40cm以上の範囲にわたり、変化が大きい。冠雪深度は、マイクロ波の放射特性に影響する。そこで、氷-雪計のマイクロ波リモートセンシングのためには、冠雪深度の出現を統計的に扱う必要がある。著者らは、実験的に決定した冠雪深度の確率密度関数を提案する。

熱伝導率、密度、および採取深度の間には互いに相関がある。熱伝導率は、密度が高いほど高い。密度は、深度が大きいほど大きい。それゆえに、熱伝導率は大きな深度で高い。

キーワード：海水モデル、チュクチ海、縁海、構造、熱伝導率、冠雪、マイクロ波

Structure and Thermal Conductivity of Marginal Sea Ice in the Arctic Ocean

Yasunori SASAKI*³ Hideomi NAKAMURA*⁴
Kiyoshi HATAKEYAMA*³ Toru NAKAMURA*³
Shinya KAKUTA*³

Comiso has proposed a sea ice model, however, the model is not practical for the Chukchi Sea, one of the marginal seas, since fresh ice is most frequently seen here. Authors, therefore, propose some ice models of the Chukchi Sea along with thermal conductivity. Sea ice shows the highest variability in structure and they are categorized into five groups. Occurrence of each ice type is also estimated.

Sea ice is accompanied by snow cover. The depth ranges from 1 to 40cm or more and

* 1 海洋観測研究部

* 2 科学技術庁防災科学技術研究所長岡雪氷防災実験研究所, 当センター客員研究員

* 3 Marine Research Department

* 4 Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Science and Technology Agency

also shows high variability. The snow depth affects microwave emissive property, so a statistical method for occurrence of snow depth is necessary for microwave remote sensing of ice-snow system. Then authors propose an empirical probability density function for snow depth.

Thermal conductivity, density and depths where ice samples were collected were correlated with each other. The thermal conductivity is higher at larger density. The density is higher at larger depth, therefore, the thermal conductivity is higher at larger depth.

Key words : sea ice model, Chukchi Sea, thermal conductivity, snow cover, microwave

1 はじめに

海水内の熱伝導過程が重要であることは、今更言うまでもない。北極海のように、海水が広大であれば、海水を通して大気と海洋間で交換される熱量は膨大なものとなる。しかし、海水内の熱伝導率は、海水の構造、温度分布などととも大きく変化する。しかも、海水の構造は一口に北極と言っても、場所により大きく異なる。

また、広大な北極海水を通して交換される熱量の推定も、海水の物性や性状を全域にわたり把握することは、地上観測では困難である。そこで例えば、リモートセンシング等による広域観測法と熱伝導モデルとの併用などを考える必要がある。著者らも、マイクロ波ラジオメトリにより海水を観測してきたが、特に縁海域において実際の状況と合わないことが多い。これは、用いている解析用ソフトウェアの開発段階において、十分なシートルースが行われていないためである。北極海水のマイクロ波ラジオメトリ観測のための海水モデルには、図1に示すComisoによる初年氷と1年氷のモデルがある。しかし、この海水モデルには、塩分も含まれており、必ずしも縁海海水モデルではない。

実際これまで、筆者らも1992年から1994年にかけて、北極海の縁海であるチュクチ海において実施した海水観測では、構造的にはComisoが提案した海水モデルとは全く異なる海水が多かったし、塩分も全く検出されなかった。これは、Comisoの海水モデルが、海水氷に対するものであるためであろうと考えられる。筆者らが観測を実施している北極海縁海には、シベリア大陸および北アメリカ大陸から多量の河川水が流入しており、これを起源とする海水が多量に存在するためであることは、これまでの観測から疑いのないところであろう。

さらに、縁海域の海水を構造及び熱伝導の上からモデル化することは、現在筆者等が進めている海水変動モデルの開発にも大いに貢献するものと考えられる。それ

は、海水変動モデルの開発には、冠雪を含めた海水の構造だけでなく、熱伝導過程に関する一般的知見などが必要となるためである。そこで、本論文では、北極海縁海、特にチュクチ海における海水の構造の代表例の幾つかをもとに、当該海域の海水の構造を幾つかのタイプに分類し、その出現頻度等を明らかにするとともに、マイクロ波ラジオメトリにより、氷型や冠雪深度が著しく変化する海水域の観測法を検討する。

2 海水試料の採取および諸測定

2.1 試料採取海域

図2は、北極海縁海域の海水試料採取地点を示す。試料採取は大別すると2海域で得たものである。図2において、●で示した地点は、1991年度に実施された北極海総合観測計画IAOE (Interanational Arctic Ocean Expedition) において試料採取を行った地点を示す。また、チュクチ海海域での観測は、1992年から1994年にかけて実施した。図3は、チュクチ海観測において、海水試料採取を実施した地点を示す。試料採取地点は計9ヶ所に上り、各地点において、ドリリングにより数個の海水試料を採取した。なお、チュクチ海の観測には、観測船として、米国国立科学財団が所有し、アラスカ大学が運航する耐氷船「アルファ・ヘリックス」(297トン)を使用した。

2.2 測定

試料採取後は、諸測定を観測船内において直ちに実施した。測定項目は、熱伝導率を始めとする物性のほか、密度、塩分などを測定した。図3は、熱伝導率測定に用いた熱伝導率計の断面を示したもので、熱伝導率の測定は -5°C の条件のもとで実施した。

また、図3に示す各点では、海水上の冠雪深度の測定を合計で約200ヶ所で実施し、マイクロ波ラジオメトリ観測に必要な、冠雪深度の出現確率分布関数や出現確率

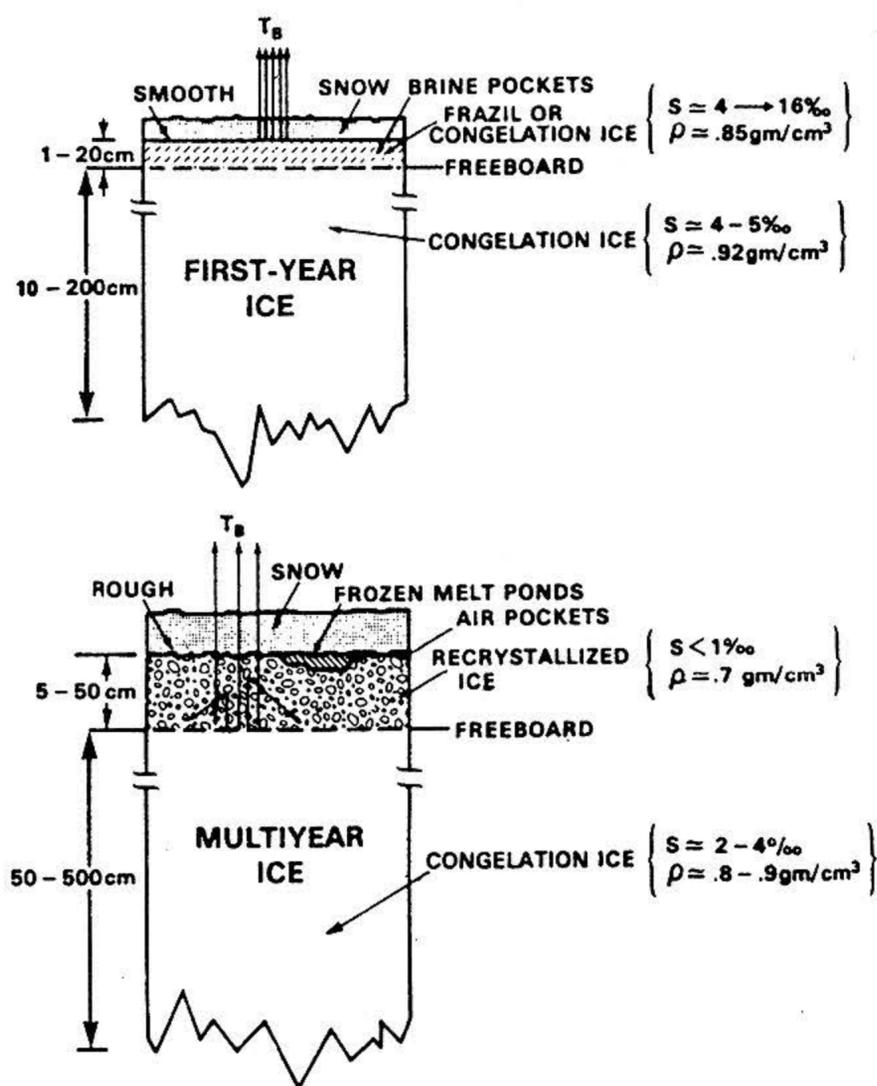


図1 初年氷と多年氷の基本的差異を示す模式図
Fig.1 Schematic diagram illustrating the basic difference between first-year and multi-year ice (from Comiso, 1983).

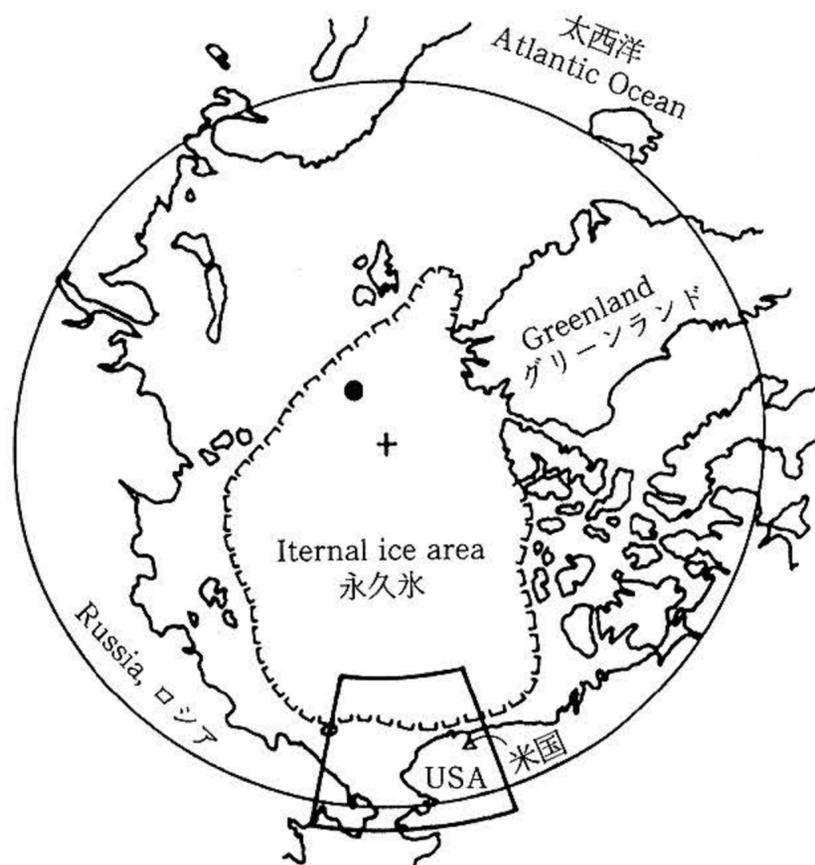


図2 観測点。●は1991年の国際北極海観測計画のクルーズにおける観測点である。
Fig.2 Observation site. ● is the observation site in 1991 cruise of International Arctic Ocean Expedition (84°49'N, 40°03'E; Aug. 27, 1991).

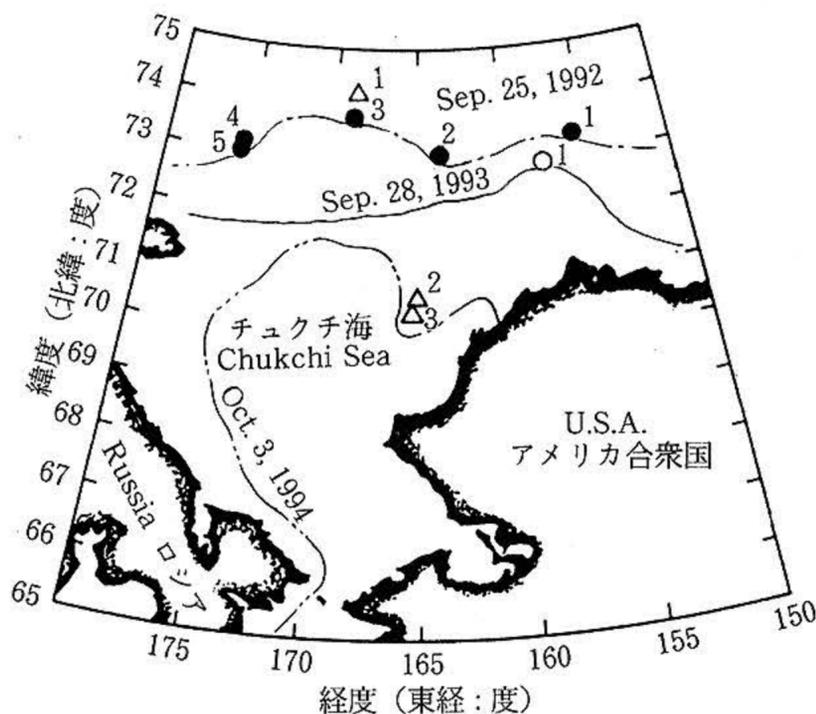


図3 雪氷および気象観測のための氷上観測点
Fig.3 Ice station for glaciological and meteorological observations.
10月初頭の平均氷端
—: 1992 - - - : 1993 - - - - : 1994
Ice station
●: 1992 ○: 1993 △: 1994

Month/Day/Year	No.	Latitude and Longitude
9/25/1992	1	71°30' 157°00'
9/26/1992	2	71°10' 163°49'
9/27/1992	3	71°46' 167°50'
9/29/1992	4	71°16' 174°32'
9/30/1992	5	71°05' 174°29'
9/28/1993	1	73°52' 157°37'
9/28/1994	1	72°08' 168°07'
10/04/1994	2	70°34' 165°01'
10/05/1994	3	70°17' 165°08'

密度関数を定めた。

3 結果および検討

3.1 海氷の構造

チュクチ海は縁海で、夏期は海水面が存在するため、風等による海氷の移動が激しい。また、海氷の離合集散が激しく、海氷同士の衝突も生じる。その結果、氷塊には数mオーダーのものからkmオーダーのものまで存在し、氷厚も数10cmから5m以上のものまでである。したがって、氷塊の一般的形状を示すことは難しいが、代表的な断面を示すと図4のようになる。

また、図3に示す各点では複数個のコア採取を行った。図5において、冠雪が20cmの深度を示す地点は、メルトポンドである。メルトポンドは、やや窪みになっている場合が多いため、雪が溜まりやすいためである。こ

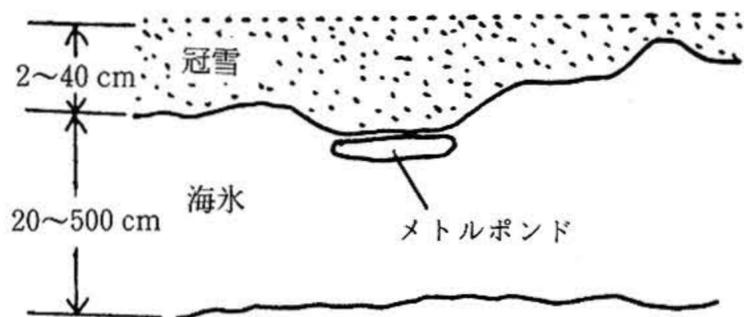


図4 チュクチ海の代表的海水の断面模式図
Fig. 4 Sectional schematic sketch of typical ice floe in the Chukchi Sea.

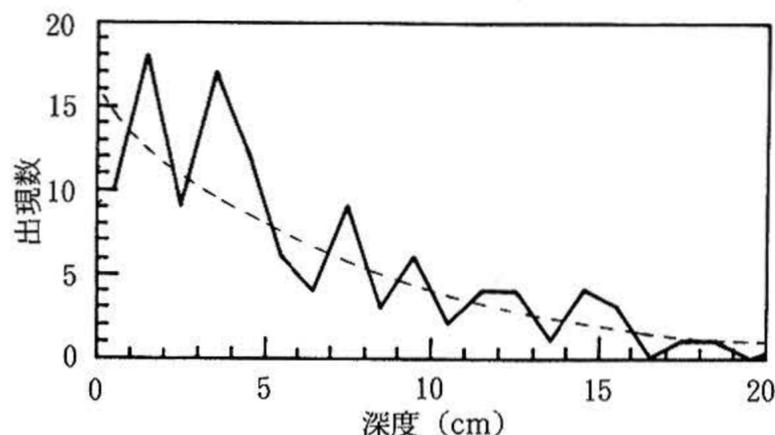


図6 冠雪の深度ごとの出現頻度
Fig. 6 Occurrence of snow depth.

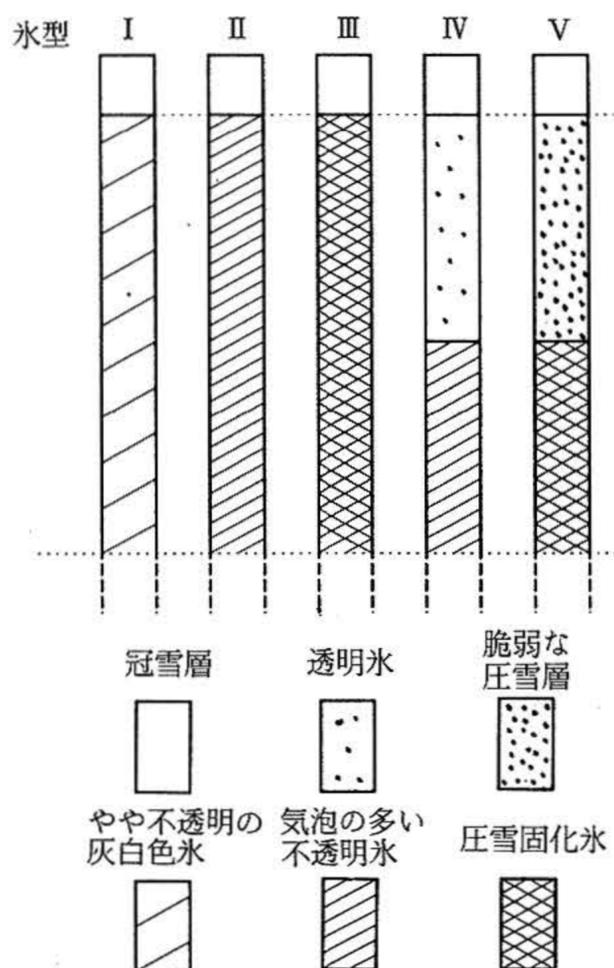


図5 チュクチ海の海水構造の5型
Fig. 5 Five categories of sea ice structure in the Chukchi Sea.

表1 氷型ごとの出現割合
Table 1 Occurrence of ice type

Ice type	Occurrence (%)
I	19.0
II	19.0
III	14.3
IV	9.5
V	14.3
Other types	23.9
Total	100.0

ものであるため、図6には加えてない。また、沿海域の海水においては、Comisoの海水モデルに見られるような、冠雪と氷との間の中間的層は見られない。

3.2 縁海海水の輝度温度モデル

3.1に述べたように、縁海域では、種々の海水が出現する。また、縁海域の海水はほとんどの場合冠雪を伴う。冠雪深度は、場所により、また季節により変化する。ここでは、夏期のチュクチ海における冠雪深度の出現頻度を図6に示す。点線で示したものは、深度の出現確率密度である。また、深度の累積分布示したものが、図7である。実線は、出現確率分布を示す。海水のリモートセンシングでは、冠雪の効果が避けられない。例えばオホーツク海の乾燥新雪の場合、18GHzでは、冠雪の深度が10cmの場合、輝度温度は約10~13K上昇することがわかっている(ただし、これは港内定着氷の場合である)¹⁾。しかし、冠雪深度は、海水の表面形状により場所ごとに深度が異なる。そこで、冠雪深度の効果を評価するためには、深度の出現を確率的に取り扱う必要がある。冠雪深度の確率分布密度関数を求めると(1)式が得られた。

$$P(Z) = 0.0877e^{-0.0877Z} \quad (1)$$

ここで、

の海水のそれまでの移動経路は不明であるが、メルトポンドの表面には10cmの透明氷が張っており、内部には真水が閉じ込められていたことから、夏期に表面が融解し、その後の気温の低下により結氷したものである。この海水は、300m×300m程度の大きさの、この海域では代表的なもので、30cm~1m程度の直径の凹みが数m間隔で存在する。このように、北極海縁海域の海水は、構造的に複雑で、一般的構造として提案することは困難である。そこで、複数の代表的な型の海水に対する出現割合で取り扱うことが最も妥当と考えられる。そこで、代表的な海水の型を図6に示す5種に分類し、3年間に得たコア21本から各型ごとの出現割合をまとめたものが表1である。メルトポンドは夏期だけ特徴的に見られる

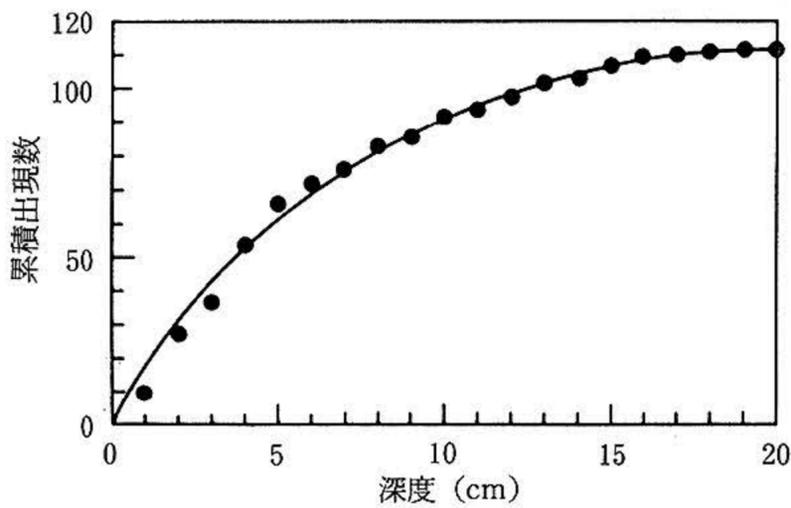


図7 冠雪深度の累積出現数
Fig. 7 Cumulative occurrence of snow depth.

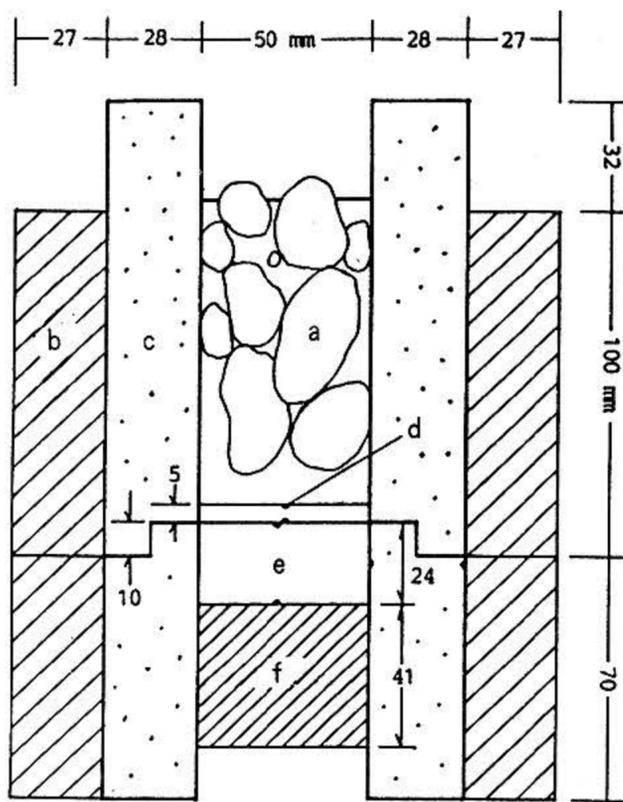


図8 熱伝導率測定システム
Fig. 8 Thermal conductivity measurement system.
a: 温度制御部
b: 内部断熱材
c: 外部断熱材
d: 熱電対
e: 測定用氷片
f: 真鍮ブロック

P: 冠雪深度の確率分布密度

$$\int_0^{\infty} P(Z) dZ = 1$$

Z: 冠雪深度

ところで、冠雪深度Zの冠雪層を持つ海水のみ掛けの輝度温度 $T_B(Z)$ は(2)式で与えられる。

$$T_B(Z) = \left\{ 1 + \frac{r-k}{r+k} + \frac{a}{b} e^{-2rz} \right\} E + \left\{ \frac{r-k}{r+k} - \frac{a}{b} e^{-2rz} \right\} T_B^{\downarrow \text{sky}} \quad (2)$$

ここで、

- $r = [(2s+k)k]^{1/2}$
- $k =$ 吸収係数
- $s =$ 後方散乱係数
- $a = (r-k) - \gamma_{\text{ice}}(r+k)$
- $b = (r+k) - \gamma_{\text{ice}}(r-k)$
- $E =$ 冠雪層の絶対温度
- $T_B^{\downarrow \text{sky}} =$ 天空輝度温度
- $\gamma_{\text{ice}} =$ 海水の反射率

である。

そこで、沿海域の海水野の輝度温度を求めるためには、上述の海水の種別割合と、冠雪深度の出現確率分布密度の両方で重み付けする必要がある。その結果、(3)式が得られる。

$$T_B(Z) = \int_0^{\infty} \left[\sum_{i=1}^n a_i T_{Bi}(Z) \right] P(Z) dZ \quad (3)$$

ここで、

a_i : 上述の氷種 ($i=I \sim V$) ごとの割合

T_{Bi} : i 種の海水が深度Zの冠雪を伴うときの輝度温度である。

3.3 海水の熱伝導率

図8は、海水の熱伝導率の測定に用いた熱伝導率計である。海水内の熱伝導率は、海水の密度に依存する。一方、海水内の圧力は、表面から下方に向かうほど高くなるため、下方の水ほど密度が高くなる。図9は、これを示したもので、チュクチ海の海水についても裏付けられており、密度は、表面から深度70~80cm付近までの間では、深度とともに急速に増大する。またこのことから、熱伝導率は、海水内での深度(海水の表面からの位置)にも関係することとなる。図10は、これを示したもので、密度の大きい下方の海水ほど高い熱伝導率を示している。そして、表面から深度70~80cmまでの、密度が深度とともに急速に増大する表面層では、熱伝導率も急速に上昇し、それ以上の深度では、緩やかな上昇に転じている。また、図11は、海水の密度と熱伝導率の関係を示したもので、やはり、表面から70~80cmの深度に相当する800~900kg/m³の密度以下の場合、熱伝導率は密度とともに急速に上昇することがわかった。

また、海水では、図10に示すように熱伝導率が深さとともに変化する。そこで、これを層厚が40cmの5層から成る複合材と見なすと、その総合熱伝導率は(4)式で与えられる。

$$K_i = (\sum (\sum Z_i / K_i))^{-1} \quad (4)$$

ここで、

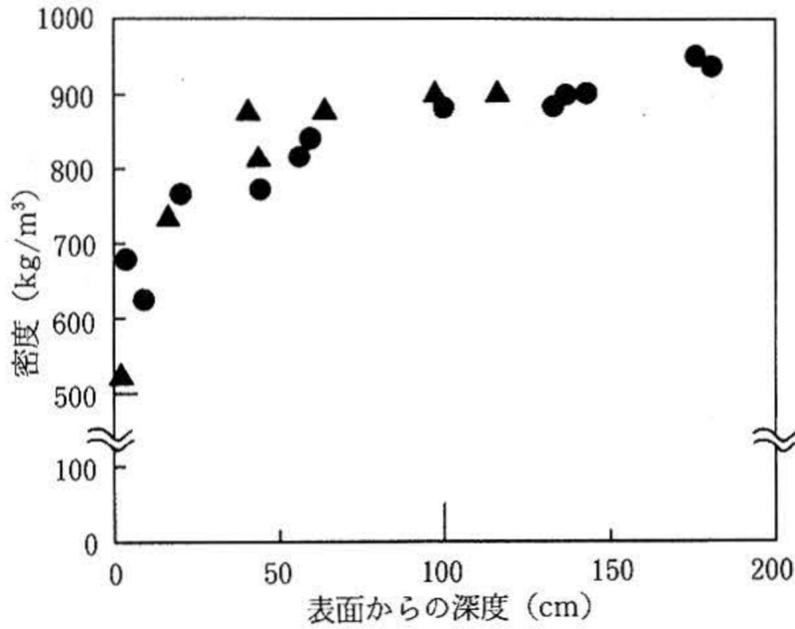


図9 海水表面からの深度に対する海水の密度の依存性
Fig. 9 Dependence of ice density on the depth from ice surface.

▲: 第3地区 (1992年9月27日)
●: 第4 " (" 29日)

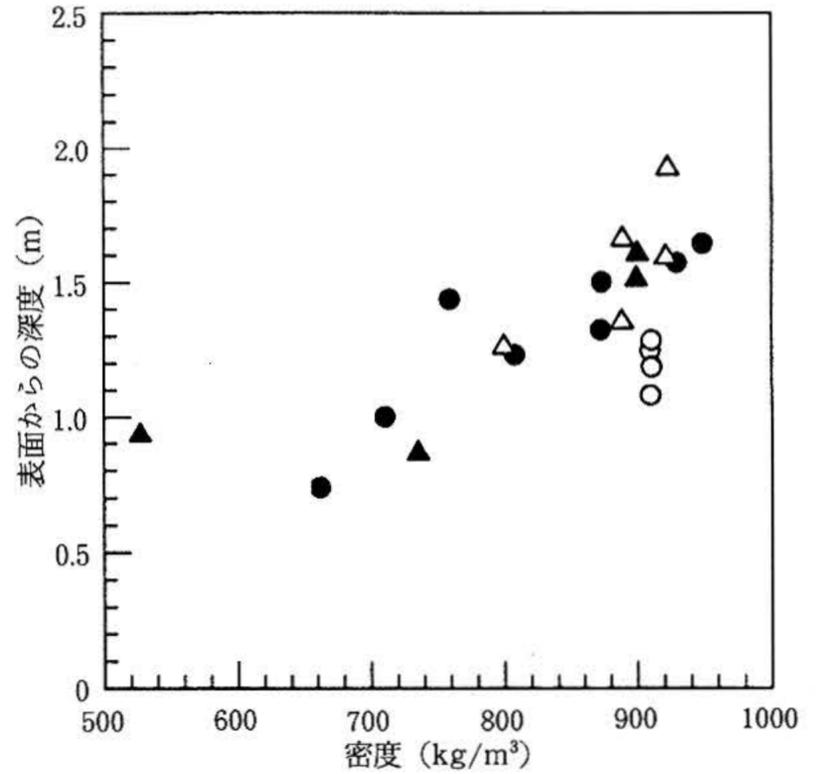


図11 海水の密度と熱伝導率の関係
Fig. 11 Relationship between density and thermal conductivity of ice.

▲: 1992年9月27日
●: 1992年9月29日
○, △: (84°49'N, 40°03'W)
1991年8月27日

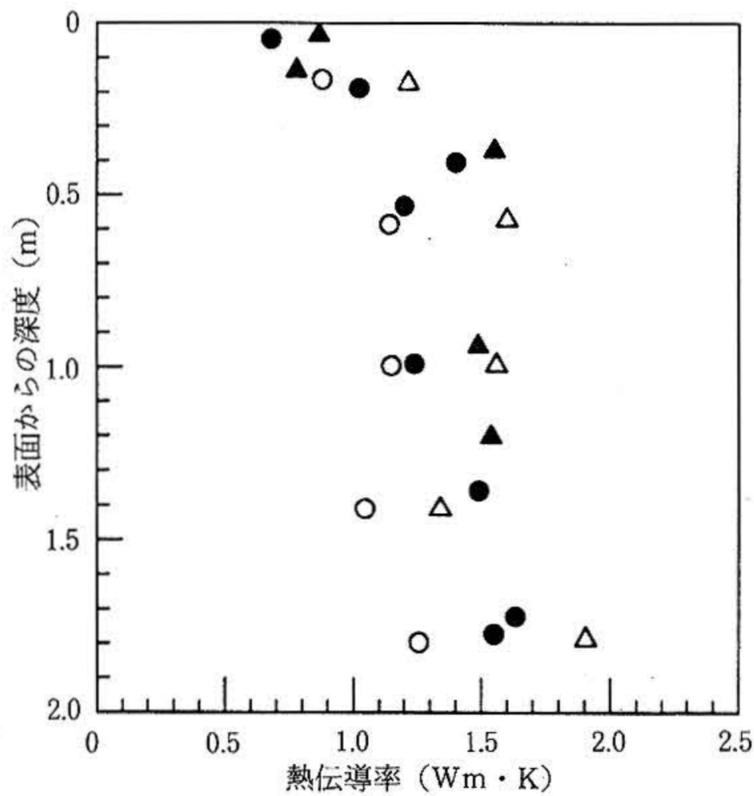


図10 海水表面からの深度に対する海水熱伝導率の依存性

Fig. 10 Dependence of thermal conductivity of ice on the depth from ice surface.

▲: Sep. 27, 1992 1992年9月27日
●: Sep. 29, 1992 1992年9月29日
○, △: Aug. 27, 1991 (84°49'N, 40°03'W)
1991年8月27日

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。そして、(4)式に熱伝導率の測定値をあてはめると、総合熱伝導率が求められる。測定結果のうち、採取から測定までの経過時間が短く、変質の度合いがより小

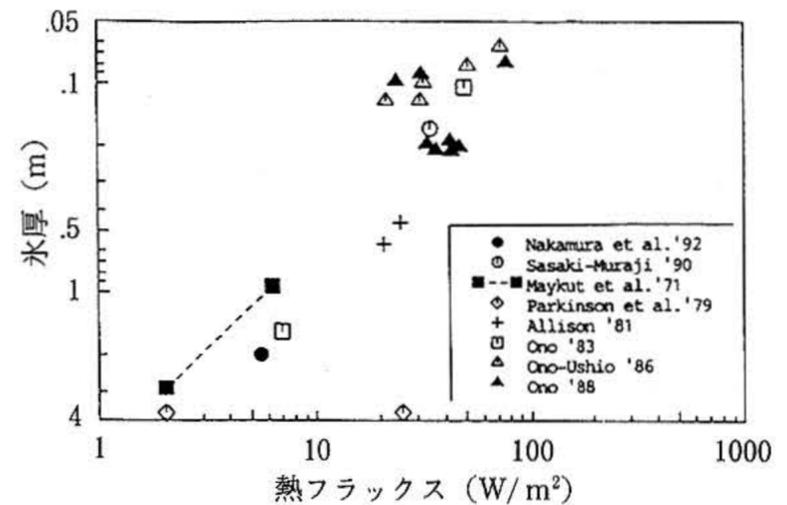


図12 北極海の海水を通過する熱フラックス (元の図は小野 (1990) による)

Fig. 12 Heat flux through sea ice in the Arctic Ocean. This figure was originally drawn by Ono (1990).

さいと考えられる試料に対する測定値を用いて総合熱伝導率を計算した結果、縁海域海水では、 $K_t = 0.554 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ となった。

この他、図12は、海水内における伝導熱量と氷厚の関係を示したものである。図から明らかのように、海水内における伝導熱量は、氷厚に反比例する。

4 結 論

- (1) われわれが観測を実施した、北極海縁海域のチュクチ海における海水は、塩分を含まず、中央海域の海水氷とは構造も異なる。そして、氷を1~2の型に単純分類することは困難である。
- (2) 海水は必ず冠雪を伴う。また、冠雪の深度は1~40cmの範囲で変化する。そこで、縁海域の海水をマイクロ波ラジオメトリーで観測する場合は、冠雪深度の出現を確率的に扱うのが効果的であろう。
- (3) 海水内の熱伝導過程は、構造、密度、海水深度等に依存する。特に、縁海域の海水は、中央海域の海水より構造が複雑であるため、海水内熱伝導過程も複雑である。

おわりに

筆者らは、現在、北極海水変動モデルを開発中で、ここに述べた海水の構造や物性に関する知見は大いに役立つものである。また、北極海水のうち、中央部の海水氷についてはある程度のデータもあり、さらに海水の構造や物性にある程度の規則性が見られる。これに対して、縁辺海の海水氷についてはほとんどデータがなく、かかる知見の更なる充実が望まれる。

また、縁辺海は、気象条件が厳しい冬期には全面結氷するため海水の移動もなく、海水についても多少の推定が可能である。さらには、この時期は太陽放射が少ないことや、海水を通して行われる大気~海洋間の熱交換量も小さいと予想されるため、当面のモデル開発では特に支障はない。しかし、海水が消滅し大気~海洋間相互作用が激しくなる夏期には、特に永久氷縁辺部分の海水の流動も激しくなるため、縁辺海の海水の観測が重要になる。現在、筆者らも北極海水の観測をマイクロ波リモ-

トセンシングにより実施中であるが、特に縁辺部分では、観測結果と実際の海水状況にかなりの不一致が見られる。これは海水や冠雪の構造を十分に考慮した解析法が得られていないためであると考えられる。これはひいては、海水や冠雪の放射伝達過程のモデル化の不備にもつながっている。本文中で述べたように、縁辺海水の合理的な統計的類型分類をさらに考えたい。

参考文献

- 1) 佐々木保徳, 北極研究グループ, マイクロ波による海水冠雪の実効深度推定法, 平成6年度(第20回)海洋科学技術センター研究報告会要旨集, pp. 178-179, 平成6年9月.
- 2) 中村秀臣・中村 亘・佐々木保徳, 北極海における海水観測 I, 科学技術庁防災科学技術研究所報告, 第50号, pp. 83-97, 1992年12月.
- 3) 佐々木保徳・村治能孝, 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, (1990).
- 4) 小野延雄, 海水の熱的性質の研究Ⅲ. 低温科学, A-24, 249-258, (1966).
- 5) 小野延雄, 海水の熱的性質の研究. 低温科学, A-24, 249-258, (1968).
- 6) Ulaby, F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung, Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. III, From Theory to Application, Artech House, Inc., 1986, pp. 1479.

(原稿受理: 1995年5月8日)