



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	比抵抗法による海水氷厚測定を試み Ⅰ
Author(s)	藤野, 和夫; FUJINO, Kazuo
Citation	低温科学. 物理篇, 19, 203-213
Issue Date	1960-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17977
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_p203-213.pdf



比抵抗法による海水氷厚測定を試み I*

藤野 和夫

(北海道大学低温科学研究所 海洋部門)

(昭和 35 年 8 月受理)

I. ま え が き

比抵抗法による電気探査法は、地下の比較的浅い部分の構造や、地下水層の深さの探査に広く用いられている。この方法を用いて海水の氷厚測定を試みた。

河や池の氷の厚さを比抵抗法による電気探査法を用いて求めることは、氷の比抵抗値が非常に高い ($3 \times 10^7 \Omega\text{-cm}$) ために、不可能であると云われている。しかし海水では、表面や内部に塩分の多い brine (氷温 -3°C で塩分 54%²⁾) が分布しているので、そのような障害は少ないと予想されていた。

Dichtel と Lundquist³⁾ が比抵抗法を利用して、海水の氷厚測定を試みたが不成功に終わった。報告からでは原因は詳しくは分からないが、海水の比抵抗値が、 $3 \times 10^6 \Omega\text{-cm} \sim 3 \times 10^8 \Omega\text{-cm}$ と報告されていることから、比抵抗値が著るしく高かつたためと、氷厚がかなり厚かつたためではないかと考えられる。しかし北海道オホーツク海沿岸の海水は、彼等の測定に使つたものと異なり、氷厚は高々 50 cm で、氷温も割合に高く、brine 細胞の孤立化も著るしくはないので、比抵抗値もあまり高くないと考えられた。1960 年 2 月オホーツク海沿岸の紋別で、比抵抗法による測定を試みたところ、2, 3 の点を改良すれば、比抵抗法による電気探査の方法で海水の氷厚を求めることが、ある程度可能であることが分かつたので、その結果について報告する。

II. 測定原理と結果の解析法

半無限物体の表面に、一直線上に等間隔 a cm で、点電極 $C_1 P_1 P_2 C_2$ を置き、 $C_1 C_2$ に電流 I amp を流した時の $P_1 P_2$ 間の電位差を V volt とする (Fig. 1)。 a をいろいろに変えて V/I を測定し

$$\rho \equiv 2\pi a V/I \quad (\Omega\text{-cm}) \quad (1)$$

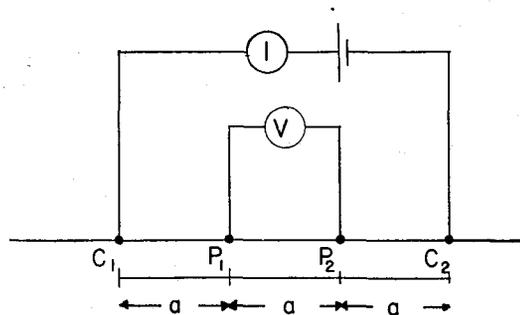


Fig. 1. Wenner's configuration for electric resistivity method.

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 570 号

で定義される ρ を a の函数として求める。この函数型より半無限物体の電氣的構造を推察することが出来る。この方法を Wenner の比抵抗法と云う。

いま物体が一様な比抵抗 ρ_1 ($\Omega\text{-cm}$) をもつときは

$$V = \rho_1 I / 2\pi a \quad (\text{volt}) \quad (2)$$

したがつて

$$\rho \equiv 2\pi a V / I = \rho_1 = \text{const} \quad (3)$$

となる。

もし物体が比抵抗 ρ_1 、厚さ d_1 の第1層と、比抵抗 ρ_2 の半無限の厚さの第2層からなる、2層構造であるならば

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} \cdot F(\rho_2/\rho_1, a/d_1) \quad (4)$$

ただし

$$F(\rho_2/\rho_1, a/d_1) = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Q^n}{\{1 + 4n^2(d_1/a)^2\}^{1/2}} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Q^n}{\{1 + n^2(d_1/a)^2\}^{1/2}} \quad (5)$$

$$Q \equiv (\rho_2/\rho_1 - 1)/(\rho_2/\rho_1 + 1) \quad (6)$$

であり、従つて(1)で定義される ρ は

$$\rho = \rho_1 \cdot F\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{a}{d_1}\right) \quad (7)$$

となる。

測定された ρ - a 曲線が、 ρ_1 、 ρ_2 、 d_1 を適当に選んだ(7)と一致すれば、物体は ρ_1 、 ρ_2 、 d_1 で決まる2層構造をもつと考えることが出来る。

この場合、実際の解析は次のようにする。

(7)より

$$\rho/\rho_1 = F(\rho_2/\rho_1, a/d_1) \quad (8)$$

(8)で ρ_2/ρ_1 をパラメーターとし、 ρ/ρ_1 を a/d_1 の函数として両対数方眼紙にえがく。この曲線群を、標準曲線と呼ぶ (Fig. 2)。

測定結果より得た ρ と a の関係を、同じく両対数方眼紙 (半透明) にえがき、これを標準曲線図上に重ねて、上下、左右に平行移動させて合致する標準曲線を求める。その曲線のパラメーターは ρ_2/ρ_1 であり、また標準曲線図の原点を、測定曲線をえがいた方眼紙の上の目盛で読み取つたものが、 $\rho_1 \cdot d_1$ である (Fig. 3)。

物体が3層以上の構造をもつ場合は、数学的解析は困難となるので、次の様な物理的考察を加える。

物体が比抵抗 ρ_1 、厚さ d_1 の第1層、比抵抗 ρ_2 、厚さ d_2 の第2層、比抵抗 ρ_3 の半無限第

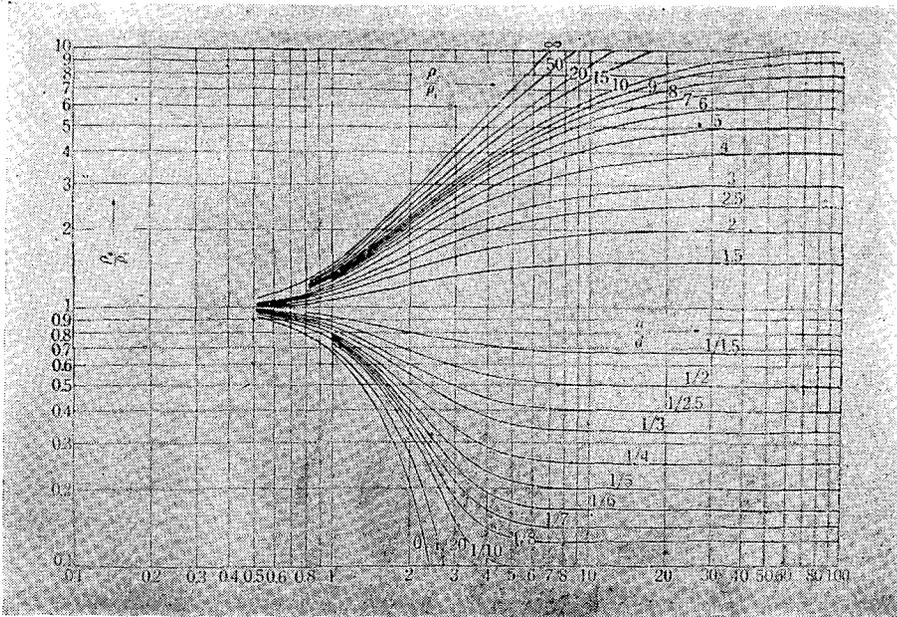


Fig. 2. Standard curves for two-layered system.

3層からなるとする。測定曲線のうち、 a が $D \equiv d_1 + d_2$ に比べて小さいところは、第3層の影響はあまりなく、2層構造の曲線に近いはずである。また a が D に比べて大となり、第1層、第2層内の電流が、ほぼ水平方向に流れる様になると、この2層は

$$D/\rho_e \equiv d_1/\rho_1 + d_2/\rho_2 \quad (9)$$

で定義される ρ_e なる比抵抗値を有し、厚さ D である層(等価層)と同じ様な影響をもつと考えられる。したがって、この部分の測定曲線は ρ_e, D, ρ_3 できまる2層構造の曲線に近くなると考えられる。

以上のような考察から、まず測定曲線の始めの部分については、2層構造の方法を適用して ρ_1, ρ_2, d_1 を求める。つぎに曲線の $a \gg D$ の部分について、2層構造を適用すれば、 ρ_e, ρ_3, D が求まるわけである。しかしこの時 ρ_e と D は(9)を満足しなければならない。

そこで(9)を変形して

$$\rho_e/\rho_1 = \frac{D/d_1 \cdot \rho_2/\rho_1}{\rho_2/\rho_1 - 1 + D/d_1} \quad (10)$$

とし、 ρ_1, ρ_2, d_1 は既知であるから、 ρ_e を D の函数として、測定曲線をえがいた方眼紙上にえ

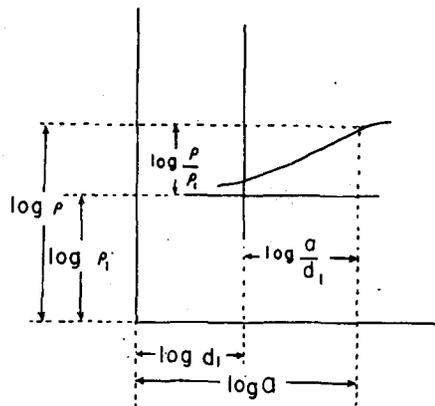


Fig. 3. Analysis of two-layered system.

がく。(この曲線を補助曲線と云う。) $a \gg D$ の部分の解析に際しては、標準曲線の原点が補助曲線上にあるように求める。

さらに多層の場合も上層を、順次上記の様に等価層におきかえることによつて、解析することが出来る。(詳細は文献4, 5)参照)

III. 測定の結果と検討

前記の方法と原理による、海水の氷厚測定を、1960年2月オホーツク海沿岸、紋別市の港内の流氷及び定着氷について行なつた。測点の位置を Fig. 4 に示す。

測定の期間を通じて、船入澗 (Fig. 4 I 附近) には、氷厚 30 cm 前後の定着氷が張りつめ、港内 (Fig. 4 P, V 附近) には、氷厚 20~25 cm の平坦な流氷が、ぎつしりつまつていたが、港外の流氷の氷量は日によつて変動があつた。

Fig. 4 の測点 V のシリーズは、2月7日、P のシリーズは2月12日、I のシリーズは2月14日に測定を行なつた。また、測点 S のシリーズは各シリーズの測定のたびに基準点として行なつたものである。測定を行なつた日の気温、水温及び氷温を Table 1 に示す。

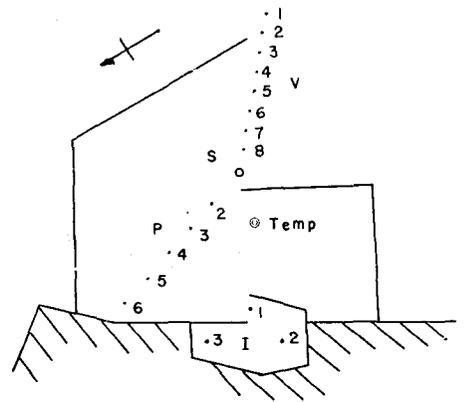


Fig. 4. Location of observed stations.

Table 1. Temperature

Date	Time	Atmospheric temperature (°C)	At 3.5 cm below surface (°C)	16 cm (°C)	21 cm (°C)	31 cm (°C)	Ice thickness (cm)
Feb. 7	9.30		-2.8	-1.1	-0.8	-0.7	20.0
" 12	13.30	-7.5	-2.6	-1.5	-1.2	-0.9	22.5
" 13	13.30	-3.5	-2.7	-1.6	-1.2	-0.7	23.0
" 14	10.30	-4.0	-3.5	-1.8	-1.3	-0.7	22.5
" 19	10.30	-5.0					

測定には、横河電機製、L10型大地比抵抗測定器を用い、電極には直径1mmの銅線の尖端3mmが氷と接する様にしたものを用いた。Wenner法による測定では、電極の埋め込みの深さが、電極間隔 a の $1/20$ 以下の場合に理論値と実測値が良く一致することが知られているので、この電極では最小電極間隔は5cmが限度で、それ以下では精度が悪い。

測定に際しては、Fig. 1の如く4ケの電極を氷上に一直線上に配置して、 a を5cmより100cm、または150cmまで変化させて、各々の R の値を読みとつた。その後、氷上にドリルで穴を開けるか、または切り出して、スケールで氷厚を実測した。またS点で海氷の塩分分析

用の柱状試料及び海水下の海水を採取した。

測定の結果得た $\rho-a$ 曲線の大部分は、Fig. 6 より Fig. 13 に示したような、3層構造と見なすことが出来るものであつた。それを前記した方法で解析して、氷厚及び各層の厚さ、比抵抗値を求めた。各測点について電気探査法で求めた氷厚と実際の氷厚を Table 2 に示す。

測定した平坦な海氷の垂直断面は、Fig. 5 に見られるように、表面近くの granular ice か

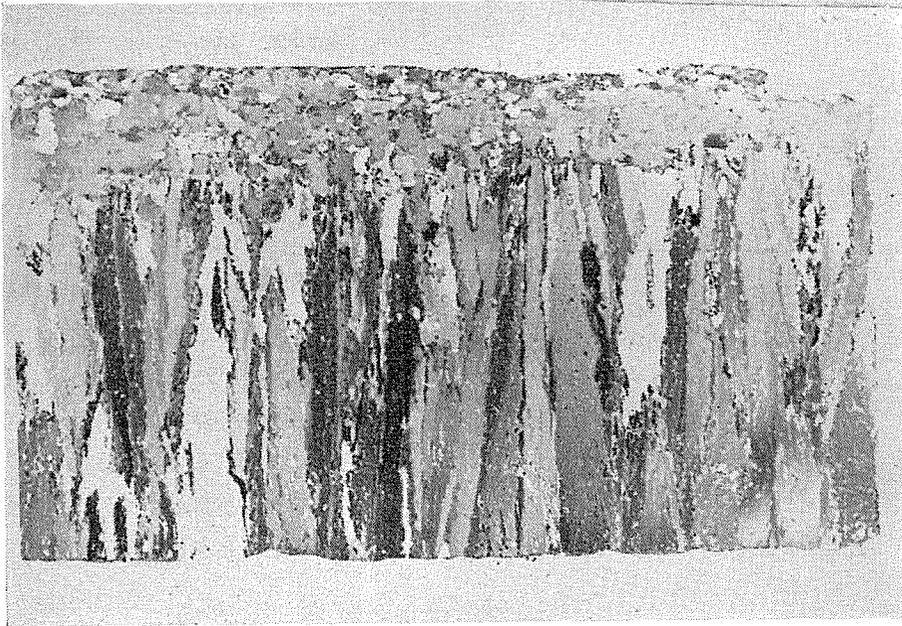


Fig. 5. An example of the vertical section of sea ice.

Table 2. Ice-thickness and resistivity

Station No.	Thickness of the first layer (cm)	Resistivity of the first layer ($\times 10^2 \Omega\text{-cm}$)	Analysed thickness of Sea Ice (cm)	Resistivity of the second layer ($\times 10^2 \Omega\text{-cm}$)	Resistivity of Sea-water ($\times 10^2 \Omega\text{-cm}$)	Actual thickness of Sea Ice (cm)	Remarks
V 7	6.5	8.8	19.5	16.5	3.2	20.0	Feb. 7
V 8	6.4	11.4	20.5	21.0	3.0	20.0	"
P 2	6.4	7.2	32.0	21.5	4.2	21.0	Feb. 12
P 3	6.0	7.5	30.0	19.0	5.0	22.1	"
P 4	6.3	7.3	31.5	20.0	4.0	22.8	"
P 5	7.0	6.4	23.0	14.0	2.3	20.2	"
P 6	8.5	7.6	31.0	14.0	3.2	20.2	"
S 12	6.4	6.3	32.0	17.0	4.4	22.5	" 12
S 13						23.0	" 13
S 14	7.0	14.2	33.0	26.5	6.8	22.5	" 14
S 19						27.5	" 19

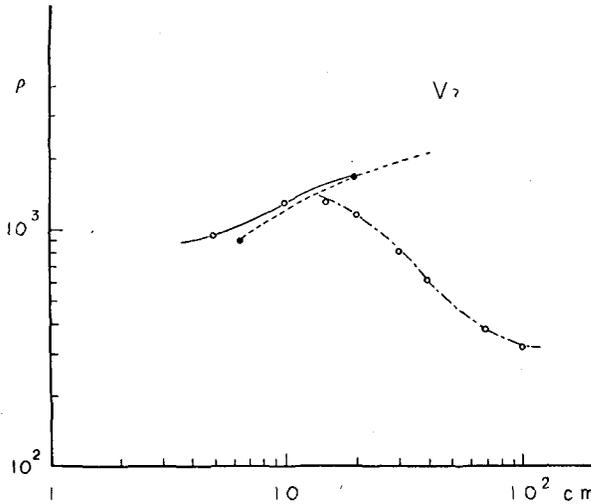


Fig. 6.. Obtained $\rho-a$ curves analysed as three-layered systems.

- standard curves for $a \ll D$
- ⋯ auxiliary curves
- - - standard curves for $a \gg D$
- experimental points
- origins for standard curves

した違いは大きすぎるように思われる。すなわち、この差異はもつと本質的なものと考えられる。

Dichtel と Lundquist によれば、海水の比抵抗値は大きな方向性を有し、垂直方向の値は

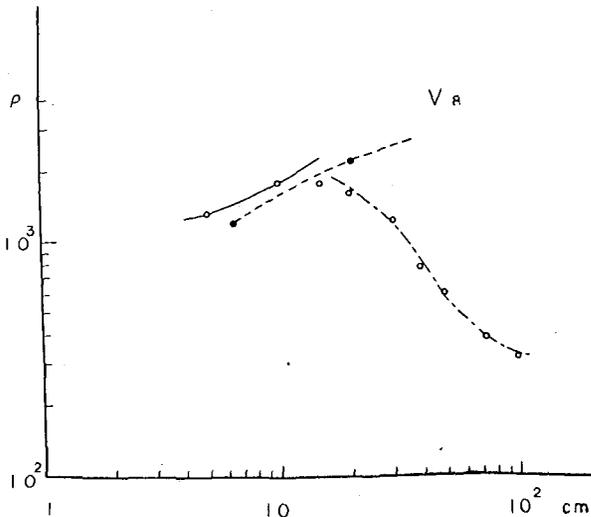


Fig. 7.

らなる第1層と、第2層の mosaic ice に分かれており、各層内部の brine の分布や形状が著るしく異なることから、この2層の電気的性質も異なると考えられる。したがって $\rho-a$ 曲線のあらわす3層は granular ice, mosaic ice, 海水と考えられる。

Table 2 から分るよに、電気探査で得た氷厚値は、 V_7 , V_8 を除いて、いずれも実際の値より大きくなっている。

氷の下面にかなりの凹凸があつたり、また氷の微結晶が氷の下面にたまっていたりする場合に、電気探査によつて得られる氷厚は、実際の氷厚より厚くなることは十分考えられる。しかしそれにしては、表に示

水平方向の値に比べて著るしく小さいと言う。granular ice の層では、結晶の方向性がほとんどなく、brine 細胞の形も不規則で、分布も規則性がないので、比抵抗の方向性はあまりないと考えられる。これに対して mosaic ice の部分は、第5図のような brine の分布であるから、彼等の指摘したような、比抵抗の異方性が十分考えられる。しかし、もし垂直方向の値が、水平方向の値より小さいならば、得られた $\rho-a$ 曲線を筆者が行なつたように、比抵抗が各層が内部では等方性であると見なして

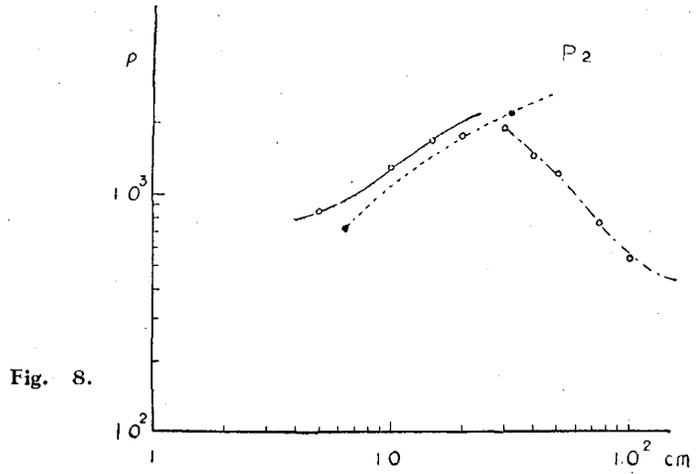


Fig. 8.

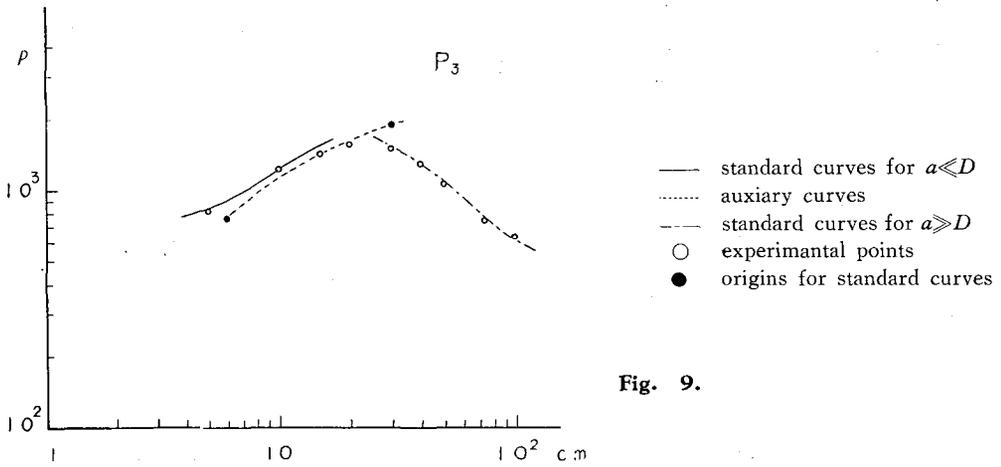


Fig. 9.

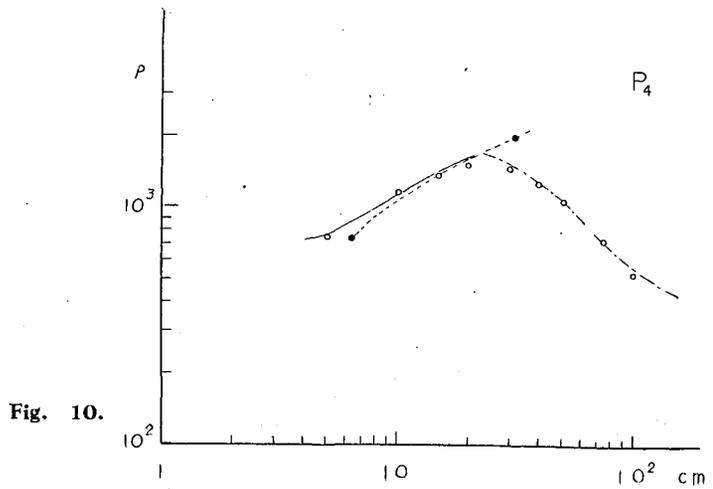


Fig. 10.

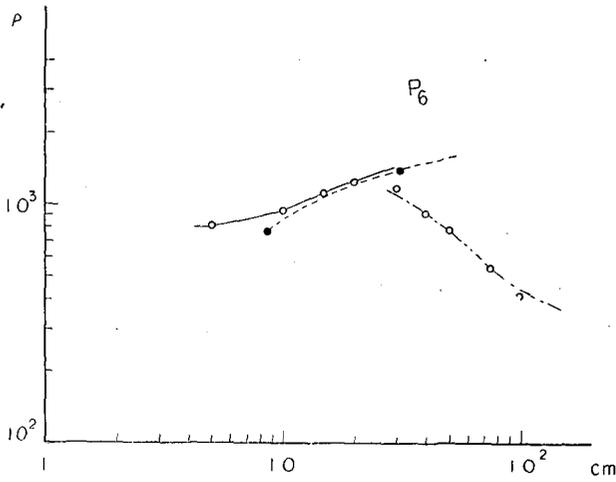
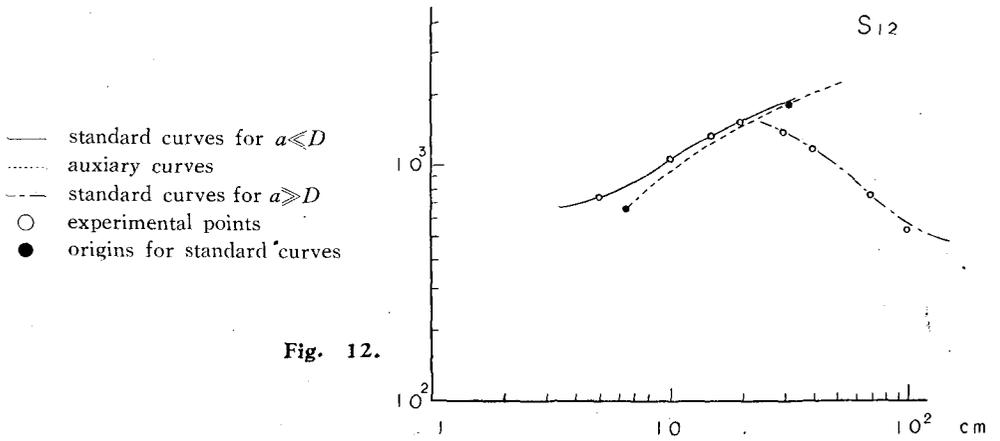


Fig. 11.



- standard curves for $a \ll D$
- ⋯⋯ auxiliary curves
- - - standard curves for $a \gg D$
- experimental points
- origins for standard curves

Fig. 12.

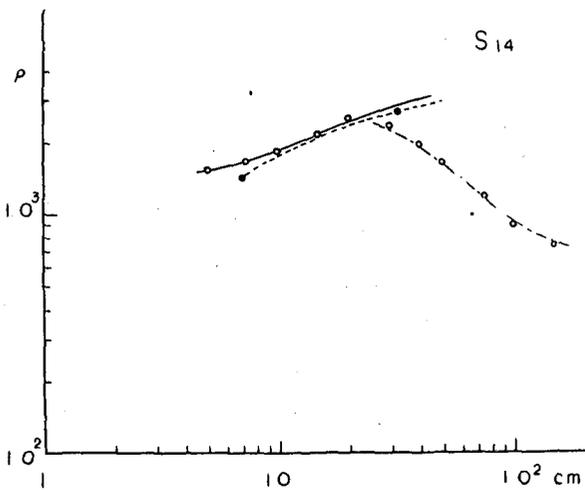


Fig. 13.

解析した場合には、実際の氷厚値よりも小さな値が出るはずである。したがって、氷厚の実測値と測定値の差異は、異方性によるものではないと考えられる。

第3層が海水の層であることは疑いないが、この層の比抵抗値が Table 2 に見られるように、同じ測点でも、日時の違いによつて値が異なつたり、ほぼ同一時刻でも場所によつて異なつている。これは海水直下の海水の塩分が、流入している河川水の量や、氷の融解、成長によつて変化しているためと考えられる。

現場で採水した海水の塩素量を、Mohr の銀滴定法で求めた結果は 13~14% であつた。この程度の塩分濃度の時には、比抵抗値は 45~50 $\Omega\text{-cm}$ であり、解析値の方がいずれも大きな値を示している。これは第1層及び第2層の比抵抗値が、海水のそれよりも非常に大きいため、その影響を受けて見掛け上、大きな値となつているのか、または海水の直下に塩分濃度の低い薄層が、実際に存在しているために、その影響で高くなつていようと考えられる。

100 cm 附近の点がいずれも標準曲線からやや下方にずれているのは、さらに下方に比抵抗の少ない層が存在する可能性を示している。鈴木、石田⁹⁾によれば、現場附近の海水下の塩分の垂直分布は、Fig. 14 の如く、変化の著るしい層と、塩分が一樣な層とに分かれていることが報告されている。したがつて a を更に大きくすれば、下方の塩分、すなわち比抵抗の一樣な層を捕えることが出来るであろう。

海水の比抵抗値も、Table 2 で分かる様にかなり変化している。日射によつて海水の表面の雪が融解すると、表面 brine の塩分濃度が変化する。また海水の温度の微少な変化によつても、氷中の brine の塩分濃度や、その体積が変わり、しかもその変化は、氷の温度が結氷点に近いほど著るしい。測定中の氷温は結氷点に近かつたし、また測定時の氷温は必ずしも、垂直方向に一樣ではなかつた。また測点によつて塩分量も

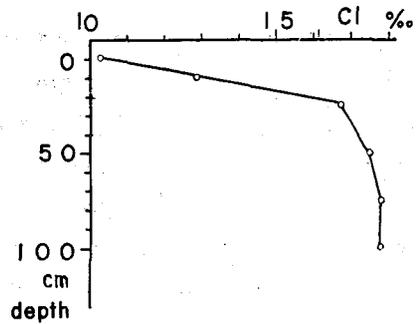


Fig. 14. An example of the vertical distribution of chlorinity. Note: Depths are measured from the undersurface of ice.

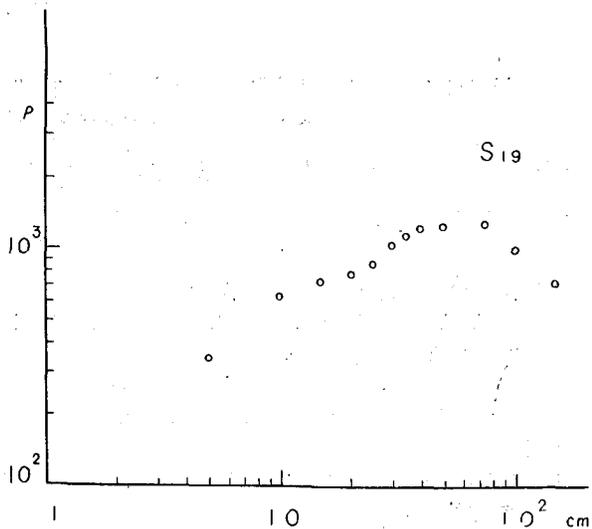


Fig. 15. An example of curves unable to be treated as three-layered systems.

いくらか異なっていたので、得られた海氷の比抵抗値が変動しているものも無理はない。

測定によつて得られた、 $\rho-a$ 曲線のなかには Fig. 15 のように、層状構造としては解析出来ないようなものも見られた。これはその附近の海氷が、水平方向に一様な構造でなかつたために起つたものと考えられる。もし電極附近に、割目や気泡などの様に、電気伝導率に不連続をおこさせるような現象があれば、当然 P_1 P_2 間の電位差に変化を与えるから、見掛けの比抵抗が変化する。したがつて成層構造の標準曲線に合致しなくなることは明らかである。そのような $\rho-a$ 曲線の解析は行なわなかつた。

IV. 結 語

今回の測定の結果、海氷—海水の系が、きわめて複雑な電氣的構造をもつと考えられるにもかかわらず、ほぼ単純な 3 層構造として解析出来ることが分つた。しかし氷厚の解析値は実測値と必ずしもよく一致しない。これは系が単純な均質等方物質の成層構造でないことによるのは疑いない。しかし解析値は一般に実測値より大きく出ることから考えると、数多くの測定を行なうことにより、3 層構造としての解析値と実測値との間の、変換係数のようなものを統計的に定義することが出来るかも知れない。

今回は解析値と実測値の比較は氷厚に限つたが、今後は比抵抗値についても、3 層モデルで得た値と実際の値との関係も調べたい。現場の比抵抗値は複雑な分布をしており、これを現場で直接求めることは困難であろうが、比抵抗値は温度、塩分の函数と考えられるから、これをあらかじめ実験室内で調べておけば、現場の温度分布、及び塩分分布から現場の比抵抗値を推測することが出来ると思われる。この点に関する実験室内の研究も今後あわせ進めたいと思う。

この研究にあつて、海洋部門の諸氏から有益な助言と協力を受けた。又測定結果の解析には、北海道大学理学部地球物理学科の田治米教授を始め、北海道地下資源調査所物理探鉱課の諸氏の御指導を受けた。あわせて厚く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 理化学便覧編纂委員会 1957 理化学便覧, 179.
- 2) Zubov, N. N. 1945 L'dy Arkiki (Arctic Ice), p. 118, Moscow.
- 3) Dichtel, W. & Lundquist, G. 1951 An investigation into the physical and electrical characteristics of sea ice. Bulletin of the National Research Council, No. 122, 122.
- 4) Jakosky, J. J., 1949 Exploration Geophysics, 2 nd ed., pp. 434-579, Los Angeles.
- 5) 萩原尊礼 1951 物理探鉱法, 135-172.
- 6) 鈴木義男・石田 完 1958 試作測器による紋別沿岸氷下の海水塩素量垂直分布の測定. 低温科学, 物理編, 17, 109-121.

Résumé

An attempt to estimate the thickness of sea ice by electrical method widely used for geophysical prospecting was made at Monbetsu on the Okhotsk Sea coast of Hokkaido in February 1960.

Wenner's four-electrode configuration for electric resistivity method was adopted in the present study. Obtained ρ - a curves are shown in figures 6-13. Though the sea ice-sea water system is considered to have a complicated electrical structure, the curves indicate that the system can be treated as a simple three-layered structure at the first approximation.

Taking the crystal structure of sea ice into consideration, those three layers are considered to correspond to the surface granular ice, mosaic ice and sea water. An example of the actual cross-section of surveyed sea ice is shown in fig. 5.

The results of the analysis of the curves are given in Table 2, which includes the actual ice thickness measured by drilling or saw-chisel method.

The coincidence of the actual and the analysed values for total ice thickness is not so good but that some improvements are necessary for the practical use of the method.

An obvious way of improvement would be to treat the system more precisely, that is, to take into consideration the electrical anisotropy of sea ice pointed out by Dichtel and Lundquist³⁾ and the electrical inhomogenities of each layer because of the inhomogeneous distribution of temperature and salinity.

However, the fact that analysed values are generally larger than actual values suggests that a kind of "conversion factor" from analysed to actual value should be determined by statistical considerations. To search for such a factor will be a more practical way of improvement.