HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	比抵抗法による海氷厚測定の試み　II
Author(s)	藤野, 和夫; 鈴木, 義男
Citation	低温科學. 物理篇, 21, 151-157
Issue Date	1963-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18001
Type	departmental bulletin paper
File Information	21_p151-157.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Kazuo FUJINO and Yosio SUZUKI 1963 An Attempt to Estimate the Thickness of Sea Ice by Electric Resitivity Method. II. *Low Temperature Science, Ser. A, 21.* (With English résumé p. 157)

比抵抗法による海氷氷厚測定の試み II*

藤野和夫・鈴木義男
(低温科学研究所　海洋学部門)

(昭和37年9月受理)

I. まえがき

前報[1]には，1960年冬に厚さ20 cm程度の平坦一冬氷に電気垂直探査法を適用し好結果がえられたが，氷厚の解析値が実測値よりかなり大きくなる困難があることをのべた。しかし前報に用いた解析法を吟味した結果，前報の測定曲線の示す氷厚値は実測値よりも逆に小さいと推定され，予想される海氷の電気的異方性と矛盾しないことが判った。

一冬氷について好結果がえられたのは，そのモザイク氷の部分の比抵抗値が海水の比抵抗値ときわめて異なっていたためと考えられるので，1962年冬には，最も比抵抗値の小さいと思われる板状軟氷について測定を行なったが，この場合も好結果をえた。

電気垂直探査(比抵抗法)の解析理論は直流定常電流についてたてられているが，測定に用いた測器(横河電機製，L-10型)は低周波交流を用いている。この場合，直流理論の適用できるための必要条件の一つは，用いる周波数附近で測定量に周波数依存性のないことである。これにつき予備的な測定を行なった。

本報では以上の諸点について報告する。

II. みかけ比抵抗曲線の解析について

みかけ比抵抗曲線の解析はふつう，予じめ計算された理論曲線と比較して行なう。2層構造については実用上十分多数の理論曲線が計算されているが[2]，3層以上については僅かの計算例しかない[3,4]。それで3層構造以上の解析は一般に2層理論曲線を用いて行なわれる。その方法は前報にのべた。前報では第1, 2層の等価層の比抵抗 ρ_e, 厚さ d_e として

$$\rho_e=\frac{d_1+d_2}{\frac{d_1}{\rho_1}+\frac{d_2}{\rho_2}},\quad d_e=d_1+d_2 \tag{1}$$

ととった(以下(1)をHummelの等価層とよぶ)。ρ_i, d_i $(i=1, 2, \cdots)$ は第i層の比抵抗値と厚

* 北海道大学低温科学研究所業績　第639号

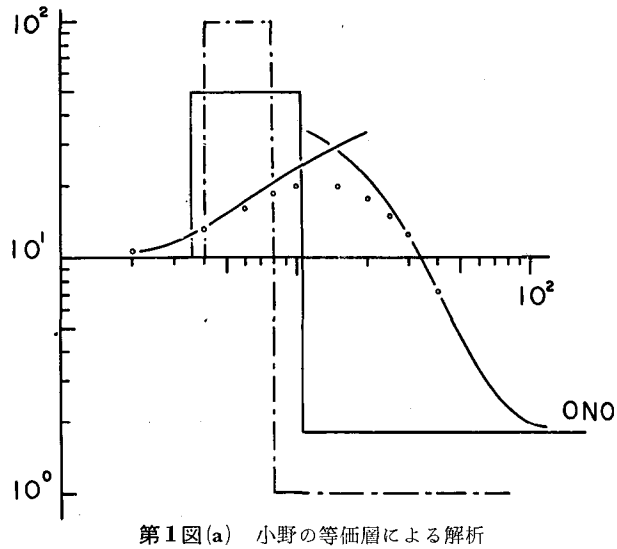
さである。しかし(1)を用い3層構造を解析すると $\rho_1<\rho_2>\rho_3$ の場合には d_1+d_2 の値が実際よりきわめて大きくなることが，Watson-Jhonson[5] により指摘された（その理由と解決法とはMaillet の論文[6] に暗示されているようである。これについては別に報告したい)。小野[7] は2層および3層構造における，表面点電荷による表面電位の漸近式を比較することにより，

$$\rho_e=\frac{d_e}{\frac{d_1}{\rho_1}+\frac{d_2}{\rho_2}},\qquad d_e=\sqrt{\left(d_1^2+d_2^2+2\frac{\rho_2}{\rho_1}d_1\,d_2\right)} \tag{2}$$

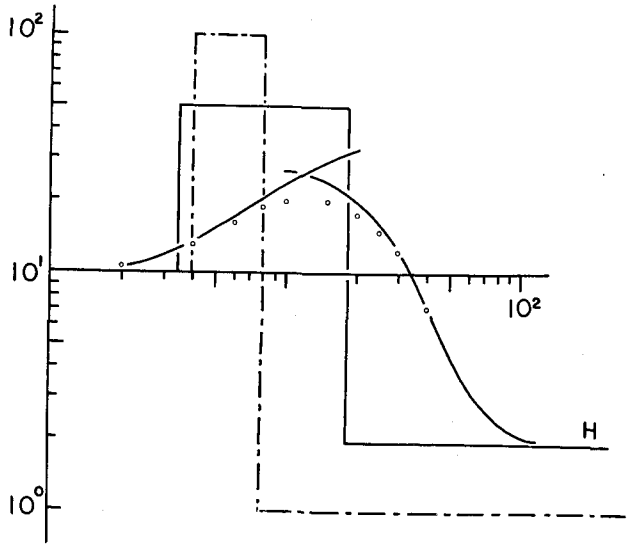
を与え，$\rho_1<\rho_2>\rho_3$ の場合に d_1+d_2 の解析値として(1)によるよりよい値がえられるとした。

第1図には，与えられた構造（鎖線，横軸は表面からの深さ。$d_1=4$，$d_2=8$，$\rho_1=10$，$\rho_2=100$ $\rho_3=1$）に対する Wetzel の計算値[3]（白丸）を観測値とみなし，これを小野(*a*)および Hummel(*b*)の等価層を用いて解析した結果（実線）を示す。小野の等価層は Hummel のよりもかなりよい結果を与えるが，両者とも，(i)ρ_2 は低く，(ii)d_1+d_2 は大きく，(iii)ρ_3 は高くでている。この結果はいま与えた構造につき測定曲線を与えた範囲（$2\leqslant a\leqslant 40$）にとった場合のもので，一般性をもつとはいえない（例えば充分大きい電極間隔まで測定があれば ρ_3 は正しい値がでる）が，類似の構造，測定範囲の時の傾向を示すであろう。

また第1図で $a=2$ の測点を除いて解析してみると，(iv) 測定最小電極間隔が d_1 と同程度以上であると，d_1，ρ_1 には $d_1/\rho_1=$一定の範囲で任意性があるが，(v)この任意性は d_1+d_2 の値には大き



第1図(a) 小野の等価層による解析



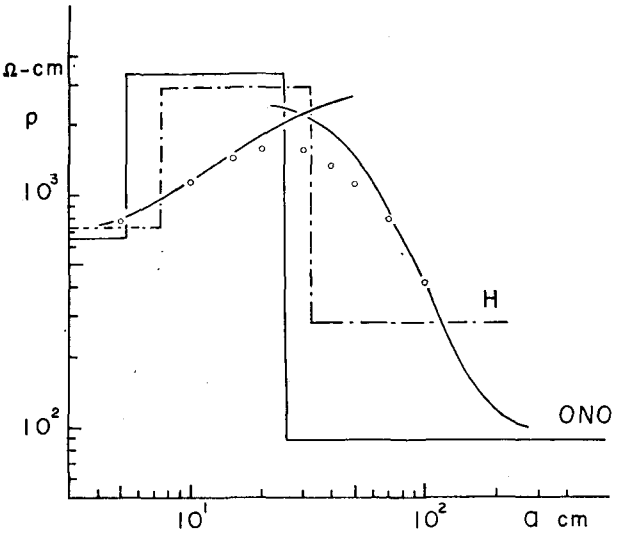
第1図(b) Hummel の等価層による解析

な影響はない，ことなども判る(これらの事実を理論的に解明した論文を筆者らは知らないが，前記 Maillet の論文[6] はその手掛りを与えている)。

III. 前報測定結果の検討

前節(ii)と第1図(b)から，前報第2表第4列の値は正確な解析値の2倍程度であり，従って正確な解析値は実測値(同表第7列)よりかなり小さいと推定される。氷厚解析値が実測値より小さくなることは，海氷の垂直方向の比抵抗が水平方向の比抵抗より小さいとすれば定性的には説明できる。このことは前報でもふれた。正確な氷厚解析値がえられれば実測値との比較により海氷比抵抗の異方性を定量的に論ずることができるが，今の場合は正確な解析値をうることは難かしいのでこれにはふれない(解析の1例は次節をみよ)。

小野の方法が Hummel の方法より好結果を与えることは前節に示した。第2図には前報測点 P4 を小野の方法(実線)と Hummel の方法(鎖線)で解析した結果を併わせ示した。



第2図 測点 P4 の小野(実線)および Hummel (鎖線)の方法による解析。

前報では $a=100$ の点を無視したので，前報第2表と第2図の鎖線とは異なっている(なお同表第5列，Resitivity of the 2 nd layer には誤って本報(1)式の ρ_e を示した，ここで訂正しておく)。小野の方法による氷厚は 25 cm で実測値 22.8 cm にかなり近い。この場合，小野の方法固有の氷厚が大きくでる誤差と，前述の異方性により氷厚が薄くなる効果とが適当に相殺するものと思われる。

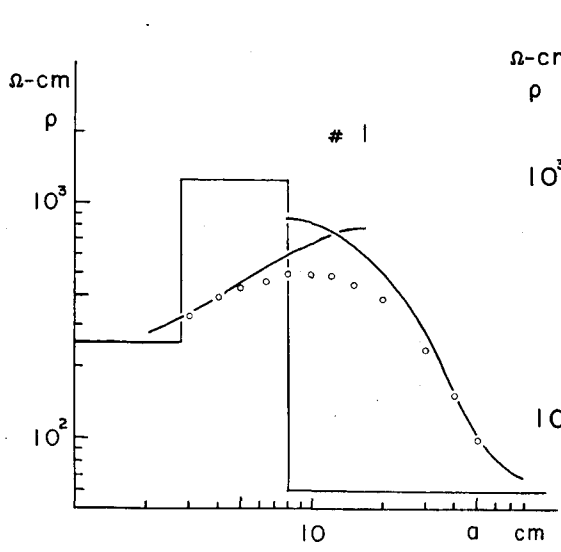
IV. 1962 年の観測

一冬氷の電気垂直探査で好結果をえたが，海氷中最も比抵抗値の低いと思われる板状軟氷でも垂直探査により海氷と海水の界面が明らかになるか否かをみるため，1962 年冬には一冬定着氷にあけた 2 m 平方の穴に新しくはった厚さ約 6 cm の板状軟氷で測定を行なった。氷厚が薄いので電極間隔は 3～50 cm にとり，とくに 15 cm 以下については 4 本の電極を所定間隔に絶縁板に固定したものを用いた。またこの測定では同一氷板上を同一電極間隔で電極を移動させて多数回の測定を行ない，測定値のばらつきをも調べた。各測点の測定回数，平均見かけ

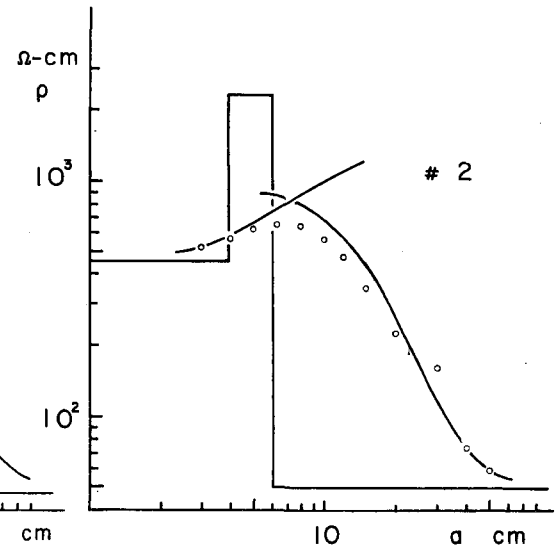
比抵抗値，偏差を第1表に示す。

第 1 表 海氷のみかけ比抵抗値（1962年2月）平均値および偏差，括弧内は測定回数

電極間隔 (cm)	測 点 1 (Ω-cm)	測 点 2 (Ω-cm)	測 点 3 (Ω-cm)
3	336 ± 20 (28)	526 ± 33 (15)	245 (1)
4	398 ± 22 (24)	553 ± 25 (14)	288 ± 9 (2)
5	437 ± 32 (12)	631 ± 45 (15)	309 ± 10 (10)
6.4	464 ± 24 (12)	663 ± 57 (7)	347 (1)
8	494 ± 28 (12)	663 ± 53 (7)	340 ± 15 (3)
10	497 ± 36 (12)	567 ± 86 (7)	336 ± 7 (14)
12	496 ± 22 (12)	486 ± 92 (7)	312 ± 7 (12)
15	455 ± 34 (6)	350 ± 48 (6)	242 ± 8 (10)
20	391 ± 14 (6)	222 ± 41 (5)	163 ± 6 (10)
30	233 ± 13 (3)	166 ± 19 (4)	87 ± 3 (8)
40	156 ± 8 (2)	74 ± 1 (2)	62 ± 2 (7)
50	98 ± 8 (3)	60 ± 0 (2)	58 ± 3 (7)



第3図(a) 小野の等価層による測点1の解析

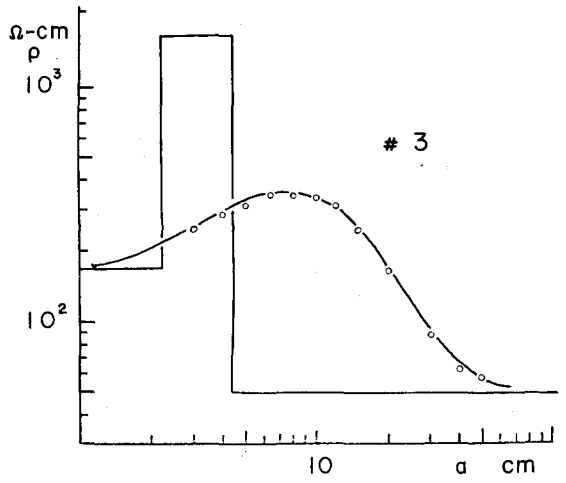


第3図(b) 小野の等価層による測点2の解析

平均値はいずれもほぼ $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ の3層型曲線となる。多少の凸凹は上述の偏差を考えれば当然無視すべきであろう。第3図(a),(b)に小野の等価層を用いた測点1,2の解析を示す。§II にのべた(iv)のとおり，この場合の d_1, ρ_1 には任意性がある。測点3は Mooney-Wetzel の3層曲線[4] 中によくあうものがあったので，これを使った解析を第4図に示す。測定値の偏差が最も少なく，解析法の誤差も少ないと思われる測点3の場合，実氷厚約6 cm に対し解析値

4 cm をえた。

Maillet[6] によれば，水平方向比抵抗 $\rho_{//}$ と垂直方向比抵抗 $\rho_{\perp}$ だけできまる最も単純な異方法をもつ厚さ d の層は，みかけ比抵抗曲線に対し，$\rho'=\sqrt{\rho_{\perp}\cdot\rho_{//}}$，$d'=\sqrt{\rho_{\perp}/\rho_{//}}\cdot d$ の厚さの層と同じ効果をもつ。測点 3 で第 2 層だけがこのような異方性をもつとすれば，第 4 図の解析値と実氷厚とから，$d_2=d\approx 4$，$d'=2$ で，$\rho_{//}/\rho_{\perp}\approx 4$ となる。

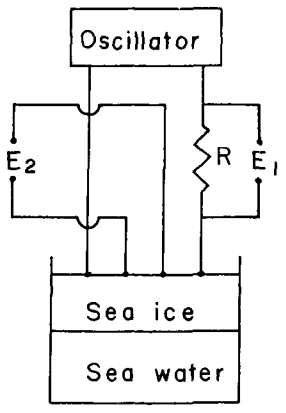


第 4 図　Mooney-Wetzel 曲線による測点 3 の解析

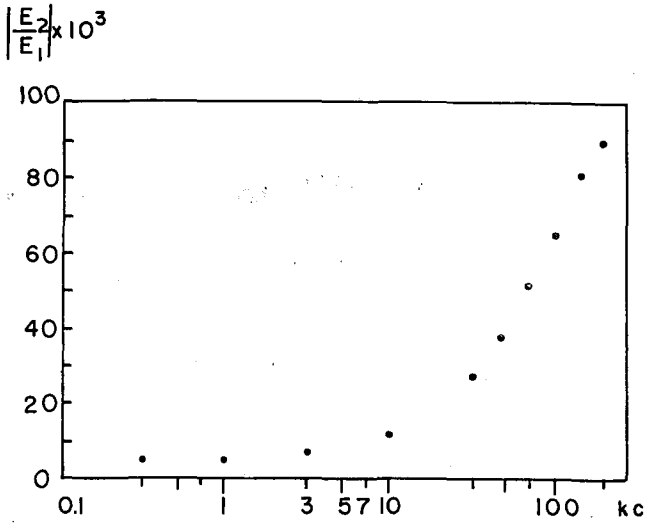
V. 海氷のみかけ比抵抗値の周波数依存性

垂直探査法の解析理論は直流定常電流にもとづいているが，筆者らが測定に用いた横河電機製 L-10 型大地比抵抗測定器は 65 c/s の低周波交流を用いている[8]。交流を用いた測定に直流理論を適用できるためには，少なくとも，測定量が使用周波数附近で周波数に無関係であることが必要である。

海氷のモザイク部分は，強誘電体である氷と良導体のブラインとのサンドイッチ構造であるから，相当大きな電気容量をもち，みかけ比抵抗値として測定している量は周波数に強く関係すると思われる。それで，第 5 図に示す配置で，電流電極に 300 c/s～200 kc/s の正弦波を与え，オッシロスコープで E_1，E_2 を観測してみた。試料は径 40 cm，深さ 15 cm のプラスチ



第 5 図　海氷“みかけ比抵抗”の周波数依存性測定図。



第 6 図　“みかけ比抵抗”の周波数依存の 1 例

ック製たらいにいれた海水を凍らせたものである。

結果の1例を第6図に示す。この例では $|E_2/E_1|$ は 300 c/s～1 kc/s で周波数に関係していない。しかし海水は電解質溶液であるため，周波数の低い方でも $|E_2/E_1|$ は周波数に関係する可能性があるから，問題とする 65 c/s 附近で $|E_2/E_1|$ に大きな周波数依存性はないとは断言できない。これについてはさらに実験を進めて次報で報告したい。

第6図で周波数が高くなるにつれ $|E_2/E_1|$ は大きくなり，海氷の比抵抗がますようにみえる。これは海氷が電気容量を持つという前述の予想と反するようでもあるが，高周波領域で $|E_2/E_1|$ がいかなる物理量を表わすものかは次報で検討したい。

VI. 結　　語

北海道オホーツク沿岸の一冬氷（氷厚約 20 cm）および板状軟氷（約 6 cm）に電気垂直探査 (Wenner 4 極法) を適用した結果，大部分の測定例につき，$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ 型3層みかけ比抵抗曲線がえられる。ρ_3 の値から第3層は海水と考えられ，d_1+d_2 の小野の方法による解析は氷厚の実測値とかなりよい一致を与える。

しかしこのような薄氷の氷厚を垂直探査で求めることは実用上無意味である。垂直探査は海氷の現場比抵抗測定の一方法と考えられるべきで，氷厚の解析値が実測値とよく一致することの意義は，同時に解析される ρ_1, ρ_2 の値の信頼性をますことにあるといえる。

ρ_1, ρ_2 を求める方法として Wenner 4 極法はあまり有用でない。今後は他の形式の電極配置について調べてみたい。海氷—海水系のような複雑な系に，低周波交流を用いてえた結果を直流理論で解析してよい結果がえられる理由は不明である。この点について実験的および理論的な検討を進めたいと思っている。

この研究に当っては，北海道大学理学部地球物理学教室より L-10 型測定器を，また北海道地下資源研究所よりは Mooney-Wetzel 曲線集その他を借用した。また両機関の研究者諸氏からは測定曲線の解析について有益な助言をうけた。厚く謝意を表する。

文　　献

1) 藤野和夫 1960 比抵抗法による海氷測定の試み I. 低温科学，物理篇，**19**, 203-213.
2) 岩津　潤・大築志夫 1952 ズンドベルグ氏 ρ-a 標準曲線の改訂．物理探鉱，**5**, 87-91.
3) Wetzel, W. W. and McMurry, H. V. 1937 A set of curves to assist in the interpretation of the three layer resitivity problem. Geophysics, **2**, 329-341.
4) Mooney, H. M. and Wetzel, W. W. 1956 The potentials about a point electrode and apparent resitivity curves for a two-, three-, and four- layered earth. Mineapolis.
5) Watson, R. J. and Johnson, J. F. 1938 On the extension of two-layer methods of interpretation of earth resitivity data to three and more layers. Geophysics, **3**, 7-21.
6) Maillet, R. 1947 The fundamental equations of electrical prospecting. Geophysics, **12**, 529-556.
7) 小野吉彦 1959 垂直探査の解析法の改良について．地質調査所月報，**10**, 669-676.
8) 淵田隆門 1949 L-10 型大地抵抗測定器の特性について．物理探鉱，**2**, No. 2, 11-00.

Résumé

In the previous paper[1], where the results of the electrical sounding (the Wenner's four-electrode configuration) of winter ice about 20 cm thick were reported, the obtained apparent resitivity curves of the $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ type were analysed by the extension of two-layer method making use of the equivalent layer defined by the formula (1) of the present paper.

In the present paper this method of analysis of curves was carefully examined after the manner of Watson and Jhonson and it was shown that the analysed values of ice thickness given in the table 2 of the previous paper should be divided by a factor which was estimated about 2 (Fig. 1 (b)). The analysed values of ice thickness then became smaller than the actual ones and the discrepancy in the analysed values and the actual ones could be attributed to the effect of the anisotropy in the electric resitivity of mosaic ice ($\rho_\perp < \rho_{/\!/}$).

Y. Ono had proposed[7] a new method of analysis to use the equivalent layer defined by the formula (2) in the present paper instead of (1). His method was also examined (Fig. 1 (a)). It was applied to one of the curves reported in the previous paper (Fig. 2). In this case the analysed ice thickness agreeded fairly well with the actual one, showing that the errors inherent in the method compensated the above mentioned anisotropic effect. This fact was considered to be practically useful.

In February 1962, the same electrical sounding technique was applied to very thin young ice, which was supposed the most conductive ice, and satisfactory results were obtained in this case, too. The obtained curves were analysed by Ono's method (Fig. 3). One of them could be approximated by one of the theoretical curves for three layer structure calculated by Mooney and Wetzel (Fig. 4). In this case, where errors due to the method of analysis of curves would be small, the anisotropic factor $\rho_{/\!/}/\rho_\perp$ of mosaic was calculated to be about 4.

The instrument used was a Megger type one (Yokogawa Electric Works Ltd. Model L-10) supplying a 65 c/s alternative current with a distorted wave form, while the theory of the electrical sounding is based on the assumption of a stationary direct current supply. As sea ice is an electrically complicated system and may have a large electric capacitance, a question should be raised about the applicability of the theory to the electrical sounding of sea ice reported in the previous and present papers, in spite of apparent succeses obtained. A preliminary experiment to answer this question was carried out.