



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪の誘電的性質
Author(s)	黒岩, 大助; KUROIWA, Daisuke
Citation	低温科学, 8, 1-57
Issue Date	1951-12-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17508
Type	departmental bulletin paper
File Information	8_p1-57.pdf



積雪の誘電的性質*

黒 岩 大 助

(低温科学研究所 應用物理学部門)

(昭和26年8月受理)

内 容

緒 言

第I章 氷の誘電的性質

1. 誘電率の測定法 2. 氷の誘電率の周波数特性 3. 氷の誘電率の周波数特性をあらわす式 4. 不純物を含んだ氷の誘電率

第II章 積雪の構造と誘電率

5. 混合誘電体に関する Wiener の理論 6. 積雪の誘電率の測定結果 7. 積雪の密度と誘電率 8. 積雪の誘電特性の時間的变化 9. 誘電特性の時間的变化と氷橋、及び誘電機構 10. Wiener の比例要請 11. 自然状態での積雪の誘電率の時間的变化 12. 積雪の含水率と誘電率

第III章 積雪の誘電損失

13. 積雪の緩和時間 14. 積雪の誘電異常現象

補 遺

要 約

緒 言

氷自体の誘電率の測定は、いままでにいくつか行われているが、積雪の誘電率についての測定はほとんどない。古くから、二種類の誘電体の混合物、すなわち、混合誘電体に対しては、理論的にも実験的にも研究がいろいろ試みられている。この場合、誘電的性質そのものに拘泥しているわけではなく、形式的には誘電的性質とだいたい同様に取扱われる熱伝導、電気伝導などの性質も対象として考えているのであつて、誘電的性質を擇んだのは、測定法が容易であるためと考えられる。それまで、ほとんどすべての場合、研究の対象となつていたものが単一な物質であつたのに対し、混合誘電体の研究は複雑な構造をもつた混合物に対する研究の手始めとも考えてよいであろう。しかしながら、今までのところ、この方面の研究はあまり発展していない。そのひとつの理由として、明確な組成の混合体が作りやすく、実験に困難を伴うことが考えられる。二種類の物質の混合体をつくるには、例えば、一方の物質を粉末にして、他方の物質のなかに分散させるというような方法をとる。この場合、物質の純粋さと、その物質の誘電率の値が正確に知られていることが必要である。しかし、粉のまゝの状態では誘電率を測定できないので、粉の状態とともに大きな塊の状態とを共にとりうるような物質でなければならないことになる。この種のものが無いわけではないが、実際問題として容易に手にはいらない。この点に関しては、雪は非常に便利な実験材料であ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第138号

る。雪は、氷と空気との混合体であり、組成の明確なことはいうまでもないし、氷と空気との誘電率の大きな差異は、混合体の構造と誘電的性質との関係を調べるのに好都合である。

氷が 10kc あたりの周波数を中心にして、交流電場に対して大きな誘電率の分散、またはエネルギー吸収を示すことは前から知られていた。したがって、雪もこの附近の周波数で同様なことを示すことは想像に難くない。いままでのところ、このことが電気通信に対して問題を起したということはあまり聞かれないが、極超短波の領域では雪や氷による障害が最近ようやく注意をひきつつある。このことから考えても、雪の誘電的性質の研究は将来に対し意味のないことではないと思われる。

積雪は、よく知られているように、時間の経過とともに、その性質を著しく変える。したがって、積雪の性質を規定することは非常に必要なことであるが、いまだにそれに適した量が見つかつていない。密度、温度、硬さ等は測定されているが、これらの量だけで積雪の性質を規定することはできないのであつて、なお、いくつかの量が必要である。そのひとつとして誘電率が考えられる。上に述べたように、雪の構造の差異は、誘電率の差異として大きく現われる可能性があり、かつ、誘電率の測定は比較的簡便に行えるからである。

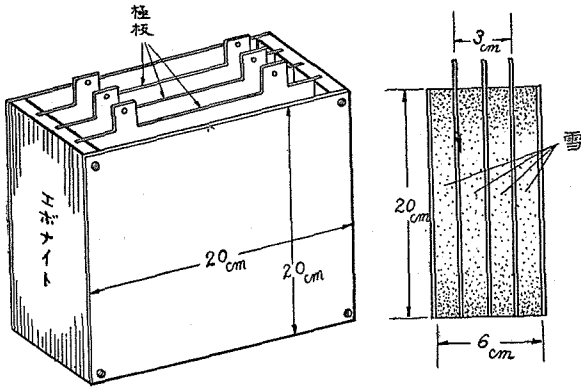
以下に述べる積雪の誘電率の研究は、以上のような理由のもとに行われたものである。全体を三つの章にわけ、第 I 章では氷の誘電的性質について論ずるとともに、便宜のため一般誘電体の性質及び誘電率の測定法について簡単な説明をする。氷の誘電率についての測定結果は、いままでに、いくつか発表されているが、それらの間にはかなり大きな開きがある。筆者自身が行つた測定結果も加えて検討し、雪の誘電率の研究に対する準備とする。第 II 章は、もつばら筆者が行つた積雪の誘電率測定結果にもとづいて、Wiener の理論により、積雪の構造と誘電率との関係を取扱う。混合誘電体に関する理論は多くの人々によつて與えられているが、どれも満足すべきものではない。ことに、混合体の構造をあらわな形でとりあつたものは少ないのである。そのなかで、Wiener の理論は、不完全ながらも、構造を“形数—Formzahl”とよばれる数であらわすことを試みており、筆者の目的にもつとも適当したものと考えてそれを用いることにした。第 III 章では、積雪の誘電率以外のいろいろな誘電的性質、なかでも誘電損失を主眼としてとりあつかう。

第 I 章 氷の誘電的性質

1. 誘電率の測定法

誘電率の測定は、もつばら、蓄電器の極板間を氷又は雪で完全に満したときの電気容量と空気のみたしたときの電気容量との比を求める方法によつた。

第 I 図が積雪の誘電率の測定に用いた平行板蓄電器である。容積 $20 \times 20 \times 6 \text{cm}^3$ の箱で両方のわき板には絶縁のために、厚さが 1cm のエポナイト板が使つてある。このエポナイト板には、雪をつめてから三枚の極板が差込めるように、1.5cm の間隔で縦に 3 本の案内の溝



第1圖 測定用蓄電器

がきつてある。先ず測定しようとする積雪を切り出してきて箱いつばいにつめたのち、雪をこわさないように静かに極板を差込む。極板は20×20cm²の面積をもつた厚さ1mmの真鍮板で、表面にはニッケル鍍金をほどこしてある。中央の極板と外側2枚の極板との間の電気容量を測定する。積雪をつめないときの電気容量は59cmである。

いま、この蓄電器に積雪をつめたときの電気容量を C_s 、積雪をつめないときの電気容量を C_n とすれば、積雪の実効誘電率 ϵ' は

$$\epsilon' = \frac{C_s}{C_n} \dots\dots\dots (1)$$

であたえられる。それ故、交流電場の周波数 f をいろいろに変えて C_s を測れば、 ϵ' の周波数特性が求められる。しかしながら、積雪は完全な絶縁体ではなく、電気伝導度をもっているし、また固有の誘電体損失を持つている。これらは、各周波数における積雪蓄電器の実効抵抗 R_s を測定し、実効電気伝導度 σ_s を求めれば、積雪の誘電体損 ϵ'' は

$$\epsilon'' = \frac{4\pi\sigma_s}{\omega} \dots\dots\dots (2)$$

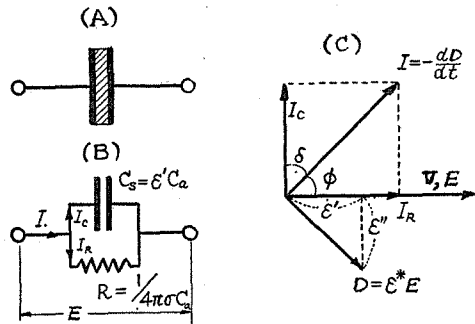
として表わされる。ここに ω は角周波数で $2\pi f$ をあらわす。かくして ϵ' 、 ϵ'' の周波数特性を求めれば、積雪の複素誘電率 ϵ^* 及び誘電体力率 $\tan \delta$ はそれぞれ、 $j = \sqrt{-1}$ として

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \dots\dots\dots (3)$$

$$\tan \delta = -\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \dots\dots\dots (4)$$

であたえられる。

一般に誘電体の ϵ' 、 ϵ'' 、 $\tan \delta$ などは次のような物理的意味をもっている。すなわち、第2図(A)において、誘電体損失をもつ不完全蓄電器を考えると、これは等価的には、(B)のごとく $C_s = \epsilon' C_n$ なる完全容量と、抵抗 $R = 1/4\pi\sigma_s C_n$ とを並列につないだ電気回路によつてあらわすことができる。ここに、 C_n はこの蓄電器の誘電体を空気としたときの容量、すなわち、幾何学的容量を示し、 σ_s は誘電体の実効電気伝導



第2圖 蓄電器にかかる電圧と電流との位相関係

度である。今、これに電圧 V なる交流電圧をかけ、蓄電器を通して流れる電流 I と V との位相関係を調べてみる。等価回路について考えれば、 I は、容量分を流れる電流 I_C と抵抗分を流れる電流 I_R とに分けて考えることができる。 I_R は V と同相にあり、 I_C は V に比べて位相が $\pi/2$ だけずれる。したがって、 V と I 、 I_C 、 I_R との位相関係は複素平面においてベクトルのにあらわしてみると (C) のようになる。 I と V との位相角を ϕ とすれば、一般に $0 < \phi < \pi/2$ であつて、 VI_R の損失がおこる。完全蓄電器ならば $I_R=0$ 、 $\phi=\pi/2$ であるから損失はおこらない。 $\delta=\pi/2-\phi$ なる角 δ は誘電体の損失角といふ (4) のなかの δ とおなじである。

しかし、蓄電器を通じて流れる電流 I は、誘電体がおこす電気変位 D の時間的な変化割合に比例する。従つて、 $I \propto -dD/dt$ であつて、 D のベクトルは I に対して $\pi/2$ だけおくれる。 V によつておこされる交流電場を E 、複素誘電率を ϵ^* とすれば、 $D = \epsilon^* E$ である。そして (1)、(2) 式によつて定義される ϵ' 、 ϵ'' と ϵ^* との間には、 $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ の関係がなりたつ。また、誘電体の単位体積、単位時間についての電力の損失は $\epsilon'' E_0^2 \omega / 8\pi$ に等しい。こゝに E_0 は E の振巾である。

測定に使つた交流電場の周波数範囲は、主に 0.5kc から 1000kc までであつた。特定の目的には 3483kc の固定周波数を使つた。実験に用いた発振器、及び測定装置はすべて筆者自身が製作したもので、各周波数範囲における測定器及び測定法は次の通りである。

周波数範囲	発振器	測定法
0.5kc~20kc	CR型発振器	交流電橋法
30kc~1000kc	ハートレー発振器	置換法
3483kc(固定)	水晶発振器	置換法、リアクタンス 変化法、間隙変化法

2. 氷の誘電率の周波数特性

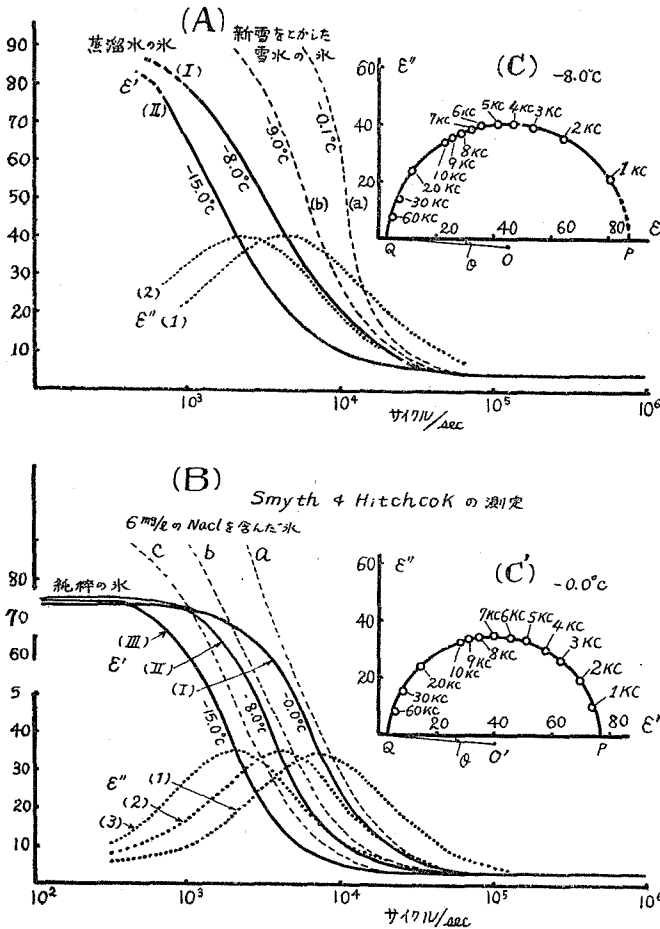
積雪は氷の粒と空気との混合物であつて、主要誘電体は氷である。それ故、積雪の誘電的性質を論ずる前に、氷の誘電的性質を知つておく必要がある。それで、まず氷の誘電率の周波数特性を求めてみた。

面積 $10 \times 10 \text{cm}^2$ の清浄な真鍮板電極 3 枚を、3mm の間隔をもたせて重ね、エボナイトの小片をはさんで絶縁固定し、これを蒸溜水中に浸して低温室で凍らせた。凍結が完了してから、この試料を適当な温度に保ち、外側 2 枚の極板と中央の極板との間の電気容量、及び実効抵抗を、周波数をいろいろに変えて測定し、 ϵ' 、 ϵ'' の周波数特性を求めた。

第 3 図 (A) はその結果である。縦軸は ϵ' 及び ϵ'' の値を、横軸は測定周波数をサイクル/秒で示す。図において、曲線 (I) 及び (1) は氷の温度が -8.0°C のときの ϵ' 及び ϵ'' 、曲線 (II) 及び (2) は温度が -15.0°C のときの ϵ' 及び ϵ'' の変化である。 ϵ' の値は、温度が -8.0°C の場合を例としてとると、0.5kc では 87、1kc では 78.9、5kc では 40、10kc では 21、50kc では 5、と急激に減少してゆくが、100kc 以上の高周波になると、ほとんど一定値 4.5 となつて、も

はやそれ以上周波数が高くなつても変化はなくなつてしまう。このように、誘電率が周波数と共に小さくなつてゆくことを誘電率が“異常分散”するという。また ϵ'' は、1kc で25、

2kcでは35、4kcでは40となり、50kc附近で極大値40.5となり、以後は周波数が高くなると共に減少してゆく。氷の温度が -15.0°C にさがると、同じ周波数における ϵ' 、 ϵ'' は温度が高い時に比べて小さくなつて、曲線は全体として低周波側にずれてゆく。一般に実用に供されている蓄電器の誘電体の ϵ' 値は、品質によつて異なるが、ゴムで2.1~2.3、雲母で4.5~7.5、紙で2~2.5、パラヒン1.9~2.3の程度であつて、これらはいかにのべた周波数範囲ではほとんど分散を示さない。



第3圖 氷の誘電率の周波数特性

このような氷の誘電率の周波数特性は、古くから (1) Dewar, (2) Wintch, (3) Ererra, (4) Smyth-Hitchcock, (5) Murphy

等によつて測定せられている。しかし、測定者により測定結果はかなり大きな開きを示している。その原因は測定技術にもあるであろうが、用いた氷の純度と凍結のさせかたによる所も大きいと考えられる。それで、もつとも純粋な氷を使つたと思われる Smyth-Hitchcock の結果を第3図(B)に示す。これは、蒸溜を何度もくりかえし、吸蔵ガスも十分に除去した極めて純粋な氷を注意して凍結させた、気泡やひび割れを含まない均質な氷についての測定である。曲線 (I), (II), (III) は温度がそれぞれ 0°C , -8.0°C , -15.0°C のときの ϵ' を、また曲線 (1), (2), (3) は同時にそれぞれの温度で測定した ϵ'' の周波数特性を示す。全体として筆者の測定値(A)とすこし違う。このあと、3箇でのべるように、極めて微量の不純物でも氷の誘電率をかなり著しく変える。筆者が試料の氷を作るために用いた水は、蒸溜水ではあるが、普通の方法で作つた蒸溜水なので、不純物を含まないとはいえない。第3図の(A)

と(B)との差は、主に不純物のためとして説明できる。

非常に純粋な(B)の水の場合には、 ϵ' は0.5kc以下の周波数ではほとんど一定値 $\epsilon_0=75$ になり、また、50kc以上の高周波では3.4なる一定値をとるようになる。その間の周波数では ϵ' は激しい分散を示す。低周波側は0.1kc附近まで測定されているが、このグラフから判断して、周波数を0にまで近づけても、 ϵ' の値は75の値を持ちつづけるものと思われる。すなわち非常に純粋な氷の静電誘電率 ϵ_0 は75である。逆に周波数の大きいところの ϵ' は一定値3.4となるが、測定に用いた最大周波数は1000kcでとまっている。これに比べると遙かに周波数の大きい光の振動数の範囲では、 ϵ' は屈折率の自乗1.7になる筈である。したがって一定値3.4は更に周波数を大きくしてゆけば変るであろう。しかし便宜のため、通常の電気発振器で得られる高周波の1000kc附近で示される一定値をこんど ϵ_∞ と書くことにする。

ϵ_0 と ϵ_∞ とは分散を示す誘電体の誘電率を取扱う場合に基準となる重要な量である。筆者の行つた普通の蒸溜水についても、高周波域では ϵ' は一定値をとり、 ϵ_∞ をきめることができるが、 ϵ_0 の方は、図からみられる通り、外挿によつて求めることは無理である。一般に数百サイクル以下の低周波における測定には測定上の困難があり、そのために ϵ_0 の値の決定はむずかしいわけである。しかし、この問題も、Cole-Coleの提称した方法⁽⁶⁾によつてきりぬけることができる。

各周波数に対して得られた ϵ' 、 ϵ'' の値から、 ϵ' を横軸、 ϵ'' を縦軸にとつて、 ϵ' と ϵ'' との関係をプロットしてみる。第3図の曲線(C)及び(C')がそれである。何れも規則正しい円弧となつてゐるが、これを“Cole-Coleの円弧”という。O、O'はそれぞれの円弧の中心を示す。この円弧が ϵ' 軸を切る二つの点をP、Qとすれば、Pは ϵ_0 、Qは ϵ_∞ をあらわす。 $\epsilon'-\omega$ の曲線から ϵ_0 を外挿する場合には、低周波側の曲線の端の附近での測定値だけによつて外挿することになるが、Cole-Cole図形によるときは、全測定値を生かして外挿することになる。Cole-Cole図形が円弧になることは、現在知られている誘電体の理論からもでてくることであり、また実験的にも多くの誘電体についてたしかめられていることである。したがつて、氷または雪の場合についても、この図形が円弧であることを仮定し、測定範囲外に外挿を行つても、あやまりはないものと思われる。

縦軸を $-j\epsilon''$ 軸、横軸を ϵ' 軸と考えれば、この曲線は、一定温度における複素誘電率 $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ の周波数特性をあらわすものとなる。周波数は、図のごとく円弧にそつて右から左へ進むにつれて増す。(C)は -8.0°C における筆者の測定値、(C')はSmyth-Hitchcockの 0°C における測定値であるが、これから ϵ_0 を求めると、筆者の場合 $\epsilon_0=90.0$ 、Smyth-Hitchcockの場合 $\epsilon_0=74.6$ となる。

3. 氷の誘電率の周波数特性をあらわす式

氷は誘電率の分散を示すが、一般に、誘電余効を示す誘電体は誘電率の分散を示す。誘電体に加えられる電場 E が時間の函数 $E(t)$ ならば、それによつておこされる電気変位 D も時

間 t の函数となるが、 $D(t)$ がその瞬間 t における E の値 $E(t)$ によつて一義的にきめられず、それまでの履歴の影響が現われる場合、誘電余効があるという。

D と E との関係は、一般に

$$dD(t-u) = E(u)\alpha(t-u)du \dots\dots\dots(5)$$

$$t > u + du$$

によつてあらわされ、 $\alpha(t)$ を Decay function という。氷も雪も誘電余効を示す誘電体で雪の $\alpha(t)$ について行つた筆者の測定結果については、のちにのべることにする。 $\alpha(t)$ は多くの誘電体の場合、 τ を時間の元をもつた常數として

$$\alpha(t) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \dots\dots\dots(6)$$

とすることができる。このような誘電体に角周波数 ω の交流電場が加えられると、誘電率が

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \dots\dots\dots(7)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \dots\dots\dots(8)$$

となることが導かれる。この(7)、(8)式を Debye の式という。兩式より $\omega\tau$ を消去すると、

$$\left\{ \epsilon' - \frac{\epsilon_0 + \epsilon_\infty}{2} \right\}^2 + \epsilon''^2 = \left\{ \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{2} \right\}^2 \dots\dots\dots(9)$$

となる。したがつて、 ϵ' 、 ϵ'' を直角坐標にとれば、 ϵ' と ϵ'' との関係を示すグラフは直径が $\epsilon_0 - \epsilon_\infty$ の円で、円の中心は、 ϵ' 軸上 $\frac{1}{2}(\epsilon_0 + \epsilon_\infty)$ の点にある。これがすなわち “Cole-Cole の円” である。

しかし、氷の Cole-Cole 図形は、たしかに円にはなるが、第3図でみたように、円の中心 O が ϵ' -軸上にない。氷に限らず、多くの液体、固体の誘電体についても、円の中心は ϵ' -軸上から外れることが多いのであつて、これを説明するために、Cole-Cole は Debye の式を少し改めて

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{1}{2}(\epsilon_0 - \epsilon_\infty) \left\{ 1 - \frac{\sinh(1-\alpha)x}{\cosh(1-\alpha)x + \sin\frac{\alpha}{2}\pi} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

$$\epsilon'' = \frac{\frac{1}{2}(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)\epsilon_0\frac{\alpha\pi}{2}}{\cosh(1-\alpha)x + \sin\frac{\alpha}{2}\pi} \dots\dots\dots(11)$$

とした。こゝに

$$x = \ln(\omega\tau)$$

である。この ϵ' 、 ϵ'' の関係をあらわすグラフもやはり円となるが、円の中心は ϵ' -軸上から外れる。 α は 0 と 1 との間の値をとり、 ϵ' -軸上の ϵ_∞ の点(第3図における Q 点)と円の中心 O とを結ぶ線と、 ϵ' -軸とのあいだの角を θ とすると、

$$\alpha = 2\theta/\pi$$

の関係がある。 $\alpha=0$ とすれば上の式は Debye の(7), (8)式と一致する。氷の場合について α を求めると 0.036 で非常に小さい。したがって、氷の Cole-Cole 図形の中心は ϵ' -軸上にあると考えても大した誤りはなく、 ϵ_0 , ϵ_∞ もその円と ϵ' -軸との交点によつて定めて差支えない。

Debye の式は、 $x = \ln(\omega\tau)$ をつかつてのようにかきなおせる。

すなわち、

$$\frac{\epsilon' - \epsilon_\infty}{\epsilon_0 - \epsilon_\infty} = \frac{e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad \frac{\epsilon''}{\epsilon_0 - \epsilon_\infty} = \frac{1}{e^x + e^{-x}}$$

この第2式は、 x について左右対称である。第3図の(A), (B)図は共に横軸に x に比例する $\log_{10} \omega$ をとつてある。したがって、 ϵ'' も第3図で左右対称となるべきであるが、事実もまたそれを示している。Debye の式には τ なる常数が入っているが、Debye の式があてはまるとすると、 ϵ'' のグラフの山の頂をあたえる角周波数を ω_{\max} とすれば

$$\omega_{\max} = 1/\tau \dots \dots \dots (12)$$

の関係があり、 τ は緩和時間である。氷の誘電特性は、稀薄な極性溶液について求められた Debye の式に完全にはしたがわれないが、かりに(12)式と第3図(B)から純粋な氷の τ を求めると、

$$1.85 \times 10^{-5} \text{ sec}$$

となる。なお、 0°C の氷の τ は $1.8 \times 10^{-11} \text{ sec}$ で氷の τ の約 10^6 分の一である。緩和時間は、はつきりした物理的意味のある時間で、氷について求めた上の値も、Debye の式に完全に従わないということから、正しい値ではないにちがいないが、氷の緩和時間にほぼ近いものを與えると考えてよいであろう。 $\omega = \omega_{\max}$ のときに

$$\epsilon' = \frac{1}{2} (\epsilon_0 + \epsilon_\infty)$$

$$\epsilon'' = \frac{1}{2} (\epsilon_0 - \epsilon_\infty)$$

が成立することが、Debye の式からでてくるが、氷について調べてみると、この関係も大体において成立している。

以上は、誘電余効の現象を出発点として考えたのであるが、誘電余効そのものは、次のように分子論的に説明される。氷の分子 H_2O は永久双極子能率 $\mu = 1.87 \cdot 10^{-18} \text{ e.s.u}$ をもっており、氷は分子結晶をなすことが知られているから、氷もまた双極子分子からなる極性物質である。しかし、氷は固体であるから、気体や液体についてみられる双極子の軸の電場による廻転は考えにくい。双極子が、磨擦や、熱振動などの抵抗力に抗して廻転するために、時間がかゝるとして、誘電余効を説明する Debye の理論は、そのまま氷にはあてはまらないわけである。まだ、充分に発展していないようであるが、氷の結晶のなかの二つの酸素分子を

つなぐ線上に、許されている水素分子の二つの位置のあいだを、電場によつて水素原子が移動するという理論によつて考えるべきであろう。水素が、一つの許された位置から、他の許された位置に移るためには、Activation energy の山をこえなければならないが、この山を越える確率によつて、誘電余効が説明される。そして、水素の二つの位置に対応するものとして、 H_2O 分子の双極子の方向が電場に対して平行か、反平行かの方向をとるという簡単な仮定をおくと、よく知られているように、先にあげた Decay function が導かれる。緩和時間 τ は、この理論によつても、温度が下るとともに長くなるが、実際に、(12)式の関係によつて、Smyth-Hitchcok の測定値から $0^\circ C$ 、 $-8.0^\circ C$ 、 $-15.0^\circ C$ における氷の緩和時間を求めてみると、それぞれ $1.85 \times 10^{-5} \text{sec}$ 、 $3.8 \times 10^{-5} \text{sec}$ 、 $8.9 \times 10^{-5} \text{sec}$ となつて、温度が低くなるに従つて長くなつてゆくことがわかる。

4. 不純物を含んだ氷の誘電率

純粋な氷の誘電率の周波数特性は、うえにのべたごとく、だいたい Debye 型の分散を示す。しかし、積雪を構成している氷は、一般に、このように純粋なものではない。雪片は落下の途中で空気中の浮遊微粒子や夾雑物を捕捉してくるし、地上に積つてからもいろいろな不純物が混入する。それ故、積雪の誘電特性を知るためには、このような不純物を含んだ氷の誘電特性も知つておかなければならない。筆者は降つてきたばかりの新雪をとかし、濾紙で固形物をとりのぞいた雪水で氷をつくり、誘電率の周波数特性を測つてみた。この雪水に含まれている不純物の種類と量の全部はわからないが、化学分析で塩素イオン濃度を測つてみると 15.6mg/l であつた。この氷の $-0.1^\circ C$ 及び $-9.0^\circ C$ における ϵ' の周波数特性を第3図(A)の a, b に示す。図のように、 ϵ' は蒸留水でつくつた氷に比べて、 100kc 以下の低い周波数において異常に大きくなつてゆく。

Smyth-Hitchcok も純粋な氷が僅かの電解質を含んだとき、誘電特性がどのような影響をうけるかをみるために、再蒸留水に濃度にして約 6mg/l の NaCl を溶かした水を凍らせて氷をつくり、誘電率を測定した。この濃度は、約 $3:10^6$ 個の水分子に対して1個の割合で NaCl の分子が存在するというほど稀薄なものである。塩類を含んだための氷点降下も $-0.0007^\circ C$ であつて、ほとんど純粋の氷と見分けがつかない。ところがこの氷の ϵ' の周波数特性を求めてみると、第3図(B)の点線 a, b, c のようになり、異常分散域以下の周波数では、何れも同温度における純粋の氷の ϵ' に比べて数%大きくなる。 1kc 以下の低周波では 20% をこえる。しかし、 60kc 以上の高周波では、ほとんど純粋の氷に等しい。このことは、NaCl の添加は、氷の分子分極には影響を及ぼさないで、双極子の配向にだけ影響を與えることを示している。たゞ添加した NaCl は $3 \times 10^{-4}\%$ というほどの少量なのに、 ϵ' は数%~ 20% の変化がおこることが不可解のようである。しかし、これは次のように説明される。氷は ϵ' の大きい偏極しやすい物体であるが、双極子の方向が、電場に平行か、反平行かの二つの方向しかないとすると、極めて僅かの数の双極子が方向転換するだけで、充分な偏極が起り

うるのである。周波数の小さいところでは、純粹の氷の ϵ' は約80である。この大きな ϵ' に対しても氷分子の双極子能率 $\mu=1.87 \times 10^{-18}$ e.s.u を用いて計算すると、IVol/cm の電場で方向転換する分子数は、 5×10^6 個の分子について1個の割合にしかならない。すなわち、電場の強さを E volt/cm とすれば、全体の氷分子のうち、わずか $0.2 \times E \times 10^{-4}\%$ だけが方向転換すれば、80という大きな ϵ' を與えるのである。(P. Debye: Polare Molekeln. P. 122. 1929.) それ故、NaCl を加えると、これは氷のなかでイオンに解離しているであろうが、イオンが近くの氷分子に作用して、方向転換のときの Activation energy を小さくして、方向転換を容易にさせるものと考えれば、 $3 \times 10^{-4}\%$ という極めてわずかの NaCl を加えても、 ϵ' には大きな変化を起させ得るわけである。さきほど、筆者が普通の蒸留水について求めた値と、Smyth-Hitchcok との値とのあいだの差異を不純物に帰するといつたのも、このような考えによるものである。今、こゝに示したように、雪をつくっている氷のなかに、かなり多量の不純物が含まれていることは、問題を複雑にするが、それも、あとで示すように、Cole-Cole 図形を利用することにより、のりこえることのできるこゝろである。

以上の諸点を要約すると、氷の誘電率の周波数特性は、大体 Debye の分数式によつてあらわされる。そして、この誘電特性をきめる誘電常数 ϵ_0 , ϵ_∞ , τ は測定者によつて差はあるが次のようになる。

測定者	ϵ_0	ϵ_∞	τ (sec)
Smyth-Hitchcok	74.6	3.0	$1.846 \times 10^{-5} e^{-0.1015t}$ (tは温度: °C)
Wintsch	73.0	7.5	$2.246 \times 10^{-5} e^{-0.0906t}$
Errera	77.2	3.0	$2.9 \times 10^{-5} e^{-0.000t}$
Murphy	95.0	3.5	$1.85 \times 10^{-5} e^{-0.106t}$
筆者	90.0	4.5	$3.54 \times 10^{-5} (-8^\circ\text{C}),$ $6.12 \times 10^{-5} (-15^\circ\text{C})$

第II章 積雪の構造と誘電率

5. 混合誘電体に関する Wiener の理論

雪は二つの誘電体、氷と空気の混合誘電体である。混合誘電体の誘電率 ϵ は、その成分の誘電体の誘電率 ϵ_1 , ϵ_2 とその混合状態によつてきまるものであるが、この関係を理論的に求めることは一般にむずかしい。Wagner⁽⁸⁾ の理論、それを更に発展させた Sillars の理論⁽⁹⁾ 等が知られているが、これらは第1の誘電体が球または、楕円体の形で第2の誘電体中に分散しているものとして得られた理論である。しかるに、雪では氷の粒の形が球や楕円体とは非常にちがっており、その上氷の粒同志が互に連結しているのだから、この理論をあてはめるのは、少し無理のようである。それで、かなり簡単な理論ではあるが、Wiener⁽¹⁰⁾ の理論をとつた方が適切と考え、それに従うことにした。

Wienerの理論は簡単にのべると次の通りである。第1, 第2の誘電体に関する量すべてに, 1, 2の添字をつけ, 混合体に関する量には添字をつけないことにする。第1の誘電体の占める容積の全容積に対する比を p とし, 混合体内の平均電場を E とすると,

$$\left. \begin{aligned} E &= pE_1 + (1-p)E_2 \\ \epsilon E &= \epsilon_1 p E_1 + \epsilon_2 (1-p)E_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

なる関係がなりたつ。 E_1, E_2 はそれぞれ第1, 第2誘電体の内部の電場の平均値である。ここで,

$$\frac{E_1}{E_2} = U = \frac{\epsilon_2 + u}{\epsilon_1 + u}$$

とおくと

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1 p U + \epsilon_2 (1-p)}{p U + (1-p)} \dots\dots\dots(14)$$

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + u} = p \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + u} + (1-p) \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2 + u} \dots\dots\dots(15)$$

の関係が導かれる。これが, 混合誘電体の誘電率 ϵ とその成分誘電体の誘電率 ϵ_1, ϵ_2 との関係を示す Wiener の式である。Uを含む(14)式で間にあうのであるが, Uの代りに u をつかうと, Lorenz-Lorentz の式に似た形の(15)式になるわけである。

U, あるいは u は, 二つの誘電体の混合状態によつてきまる常数である。したがつて, U, u の値によつてある程度, 混合状態を数量的にあらわすことができるわけである。いま, 第1の誘電体が第2誘電体のなかに分散しているものとし, 第1の誘電体に相似的に元の形を保たせたまゝ, たゞその量だけを変えたとする。このとき, いうまでもなく p は変化するが, U, u も変るであろう。しかし, Wiener は U, u の変化は p があまり大きくないうちは, p の変化に比べると小さいと考えた。そうだとすれば, p に差異があつても, 第1の誘電体の形が相似でさえあれば, U, u は一定な値をとるわけで, U, u は第1の誘電体の形だけできまる量となる。それで, Wiener は U あるいは u に形数 "Form-Zahl" なる名をあたえた。

p を一定にして, 第1誘電体の形をかえたとき, u がどのように変化するかを簡単にいうことはできないが, 次のようなことから, u の値の大きさが持つ意味のだいたいを知ることができる。第1誘電体が, 電場 E の方向に, 細かいシリンダーの形に並んだとき, u は無限大となり, そのときの ϵ の値を $\bar{\epsilon}$ とする,

$$\bar{\epsilon} = p\epsilon_1 + (1-p)\epsilon_2 \dots\dots\dots(16)$$

となる。すなわち, $\bar{\epsilon}$ は成分誘電体の誘電率 ϵ_1, ϵ_2 を各々の容積に関して平均したものであるが, この $\bar{\epsilon}$ は, 同時に, p を一定にした場合の混合体の誘電率 ϵ のとりうる最大値であることが Wiener によつて証明されている。Wagner の考えたような模型, すなわち, 第1誘電体が球で, しかもそれが非常にまばらに第2誘電体のなかに分散しているときは, 誘電率は $\bar{\epsilon}$ よりはるかに小さくて $u=2$ である。また, 第1誘電体がうすい板の形をして, 電場 E

に垂直に並んでいるときには Maxwell の考えた模型であつてこのようなときは $u=0$ となる。このときの ϵ の値は、

$$\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1(1-p) + \epsilon_2 p} \dots\dots\dots (17)$$

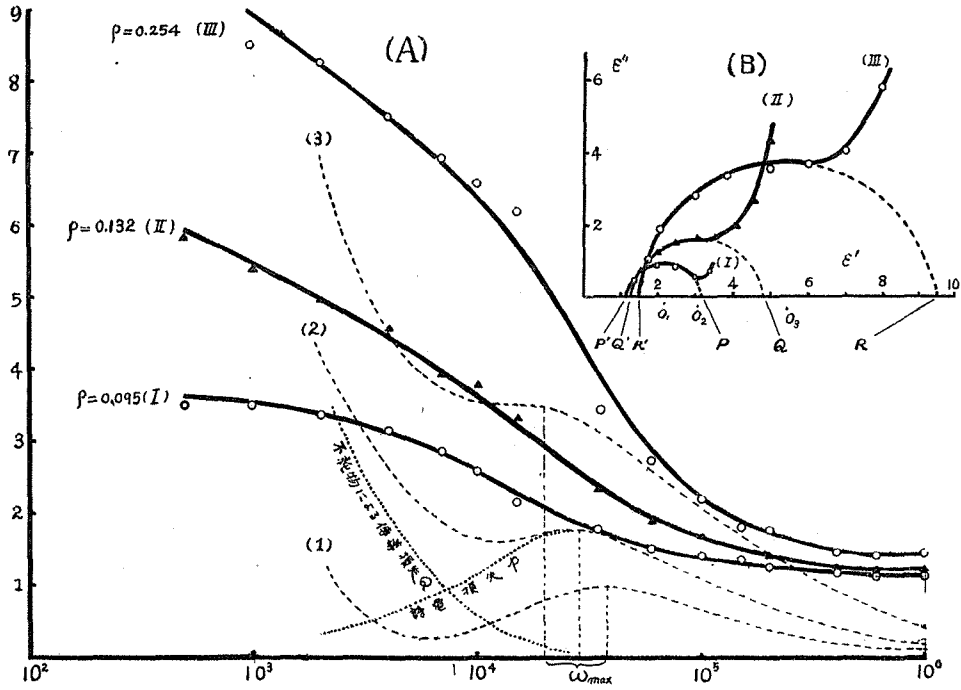
で、これが混合体としての誘電率 ϵ のとりうる最小値である。これらのことから、第1誘電体が電場 E の方向に、細長く伸びた部分を多く持つほど u は大きくなり、 E に垂直な方向に伸びた部分は、 u を大きくすることには役立たないと考えることができるであろう。雪の構造は等方性であるが、雪が新しくそのなかの氷の粒子がよく結合しあつていないときには u は小さい。雪が古くなると、粒子の間に氷の橋がかゝつて、粒子は互に連結されるようになるが、このことは、電場 E に垂直の方向にも細長く伸びた部分ができるし、また E に平行な方向にも同じく細長く連なつた氷の柱ができる。このあとのものために、 u は大きい値をとる。このことについては、のちに、実際の測定結果に関連してくわしくのべることにする。

また、 U は E_1 と E_2 との比である。いま、全く同じ構造（すなわち、第1誘電体の形も量も同じ）をもつ二つの混合誘電体を考える。この場合、成分誘電体の誘電率の比“ ϵ_1/ϵ_2 ”が各混合体について同じ値をとるならば、二つの混合体について、 U の値は等しい。なぜならば、 E_1 と E_2 との比は、成分誘電体の境界面における電気力線の屈折角によつてきまる筈でこの屈折角は、 ϵ_1/ϵ_2 の比で定まるからである。このような性質をもつ二つの混合誘電体に対しては、上にあげた式からたゞちにわかるように、 ϵ/ϵ_1 は同じ値をもたなければならない。（ ϵ/ϵ_2 についても同様）これは、いわゆる Wiener の比例要請で、比例要請についてはのちに雪についての実際の測定結果によつて論ずる予定である。

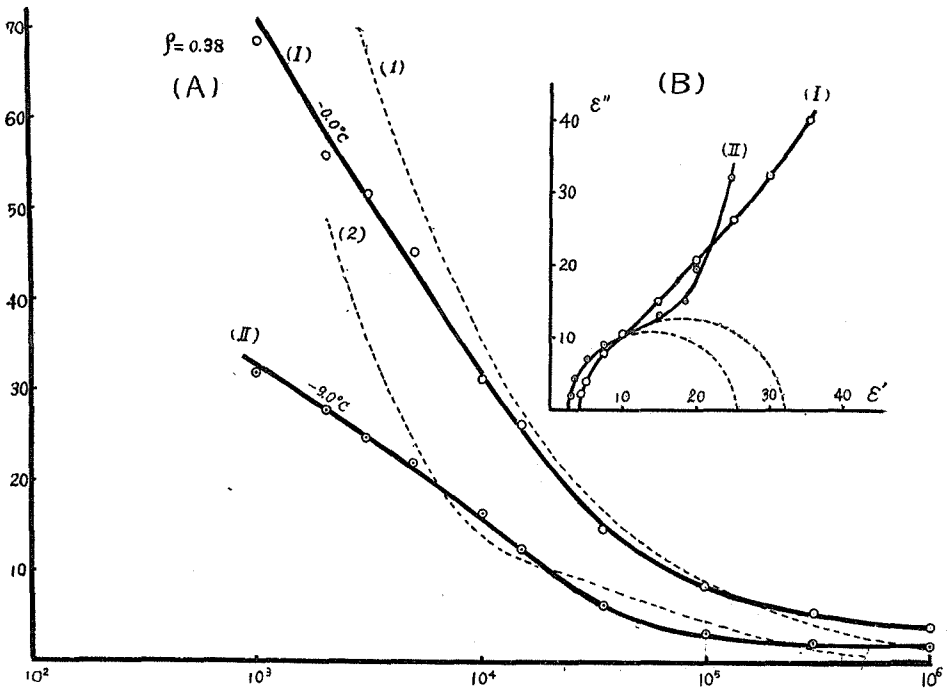
なお、以上の Wiener の理論は、誘電率が複素誘電率であつてもそのまま成立つのである。

6. 積雪の誘電率の測定結果

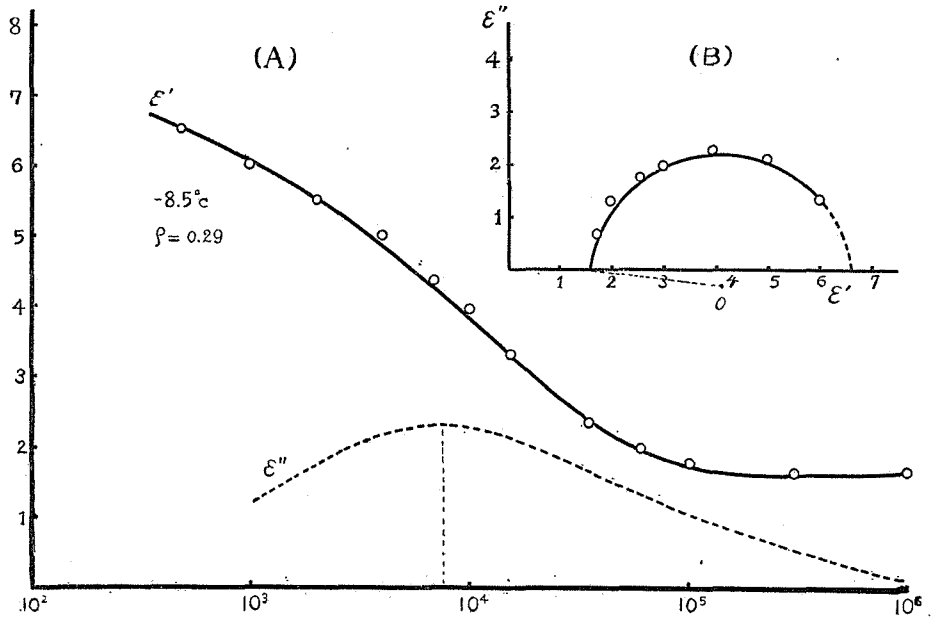
雪は地上に積つているあいだに、しだいにその構造をかえてゆく。降つたばかりの新雪はばらばらの雪の結晶が積み重なつただけのものであるが、時がたつにつれて、昇華や融解のために、雪の結晶は丸味を帯び、しかも互に氷の橋によつて連結され、全体として締つて、密度が大きくなる。更に時間がたつと、氷の粒は大きな粒となつて、いわゆるざらめ雪に変形する。このような変化の段階を大體、新雪、しまり雪、ざらめ雪の三段階にわけると、積雪のいろいろな性質が、積雪の構造の変化にもなつて著しく変ることは、廣く知られていることで、誘電率もまた、それに伴つて変化するであろう。第4図から第9図までの6図にいろいろな構造の積雪について測定した誘電率と周波数との関係、及びその Cole-Cole 図形を示した。また、これらの図から求めた誘電特性を第1表にまとめた。測定した積雪は、すべて、札幌市、北海道大学低温科学研究所構内に積つたものである。



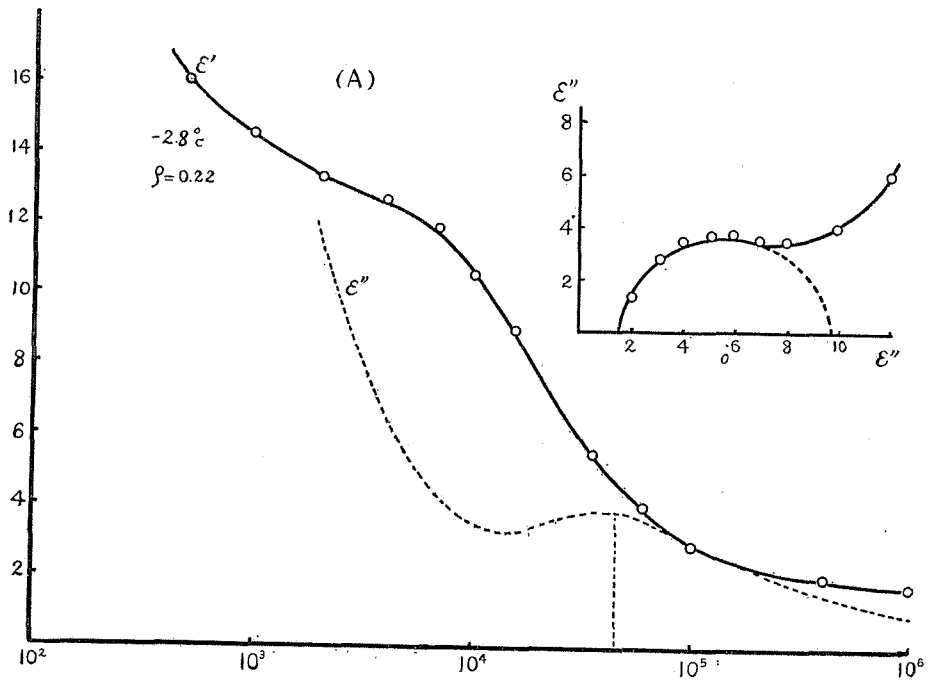
第4圖 新雪 (Iは積つたままのもの, II, IIIはIを圧縮したもの)



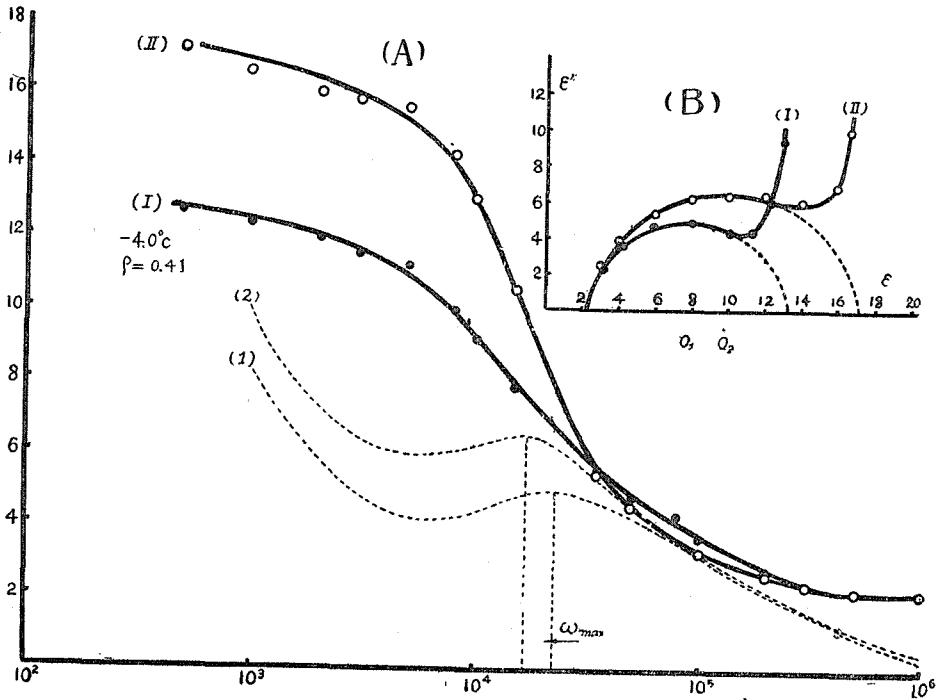
第5圖 新雪 (Iは積つたままのもの, IIは含まれている水分を凍らせたもの)



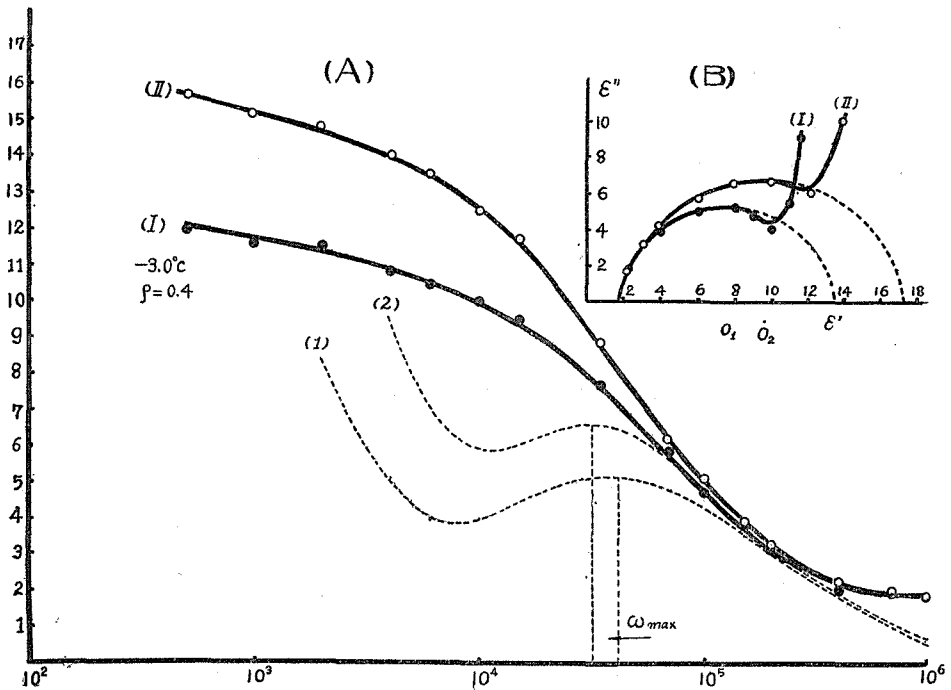
第 6 圖 人工的につくつた純粹の積雪



第 7 圖 粉 雪



第 8 圖 ざらめ雪 (Iは積雪層より切出した直後のもの
IIはそれを1日放置せるもの)



第 9 圖 かたしまりゆき (Iは積雪層から切出した直後)
IIは1日放置せるもの)

第 1 表 積雪の誘電特性

雪 質	測定温度	ρ	ϵ_0	ϵ_∞	$\bar{\epsilon}_0$	$\bar{\epsilon}_\infty$	$\epsilon_0/\bar{\epsilon}_0$	$\epsilon_\infty/\bar{\epsilon}_\infty$	$\tau_{(sec)}$	τ/τ_1	図面 番号	
新 雪	I	-1.0°C	0.095	3.1	1.15	8.9	1.25	0.35	0.92	4.2 10^{-3}	0.2	Fig 4
	II	-1.0°C	0.135	4.8	1.25	12.5	1.34	0.30	0.93	5.5 "	0.262	"
	III	-1.0°C	0.250	9.5	1.48	14.8	1.66	0.42	0.89	8.0 "	0.38	"
氷	-1.0°C	0.925	80	3.4	—	—	—	—	—	2.1 10^{-5}	—	Fig 3
ばたん雪 (Wet) 同 上 (Dry)	-0.0°C	0.38	33	4	33.4	1.98	0.98	2.02	—	—	—	Fig 5
	-9.0°C	0.38	26	1.8	33.4	1.98	0.86	0.91	—	—	—	"
純粋の雪	-8.5°C	0.29	6.8	1.65	25.8	1.75	0.26	0.94	1.87 10^{-5}	0.50	Fig 6	
粉 雪	-2.8°C	0.22	9.5	1.5	19.8	1.57	0.48	0.95	3.18 10^{-6}	0.127	Fig 7	
ざらめ雪 (充填直後) 同 上 (1日放置)	-4.0°C	0.41	13	2.0	36	2.1	0.36	0.95	6.9 10^{-5}	0.25	Fig 8	
	-4.0°C	0.41	17	2.0	36	2.1	0.47	0.95	9.3 "	0.34	"	
しまり雪 (充填直後) 同 上 (1日放置)	-3.0°C	0.4	13.5	1.85	35.2	2.04	0.38	0.9	3.7 "	0.15	Fig 9	
	-3.0°C	0.4	17.5	1.85	35.2	2.04	0.5	0.9	5.0 "	0.2	"	

(i) 新 雪 一第 4 図一

第 4 図(A)は積つたばかりの樹枝状結晶の新雪の誘電率対周波数の曲線である。このような新雪の密度は 0.1 以下で、あまりに柔らかく、そのままの状態できりとり、測定用蓄電器につめることはむづかしいが、それでも、スコップで雪を静かにすくいとり、なるべく圧縮しないようにして、蓄電器につめたら、密度にはそれほど大きな変化はおこらなかつた。測定時の雪の温度は -1.0°C であつた。第 4 図(A)の曲線 (I) 及び (1) がその一例で、 ϵ' 及び ϵ'' をあらわす。雪の密度は 0.095 である。曲線 (II) 及び (2) は同じ雪を、密度が 0.135 になるように圧縮してつめたときの ϵ' 及び ϵ'' である。曲線 (III) 及び (3) は、更に雪を圧縮して密度を 0.254 に大きくしたときの ϵ' 及び ϵ'' をあらわす。このように積雪の誘電率も周波数に対して、氷に似た異常分散を示すが、次の点で均一な氷の場合とちがう。低周波域では周波数が低くなると共に、氷の ϵ' の曲線は水平な直線になつたが、積雪の ϵ' は増加の傾向を示す。また、 ϵ' は ϵ'' の分散域で極大値をとる点では氷と同じであるが、周波数が低くなるにつれて零に近ずかず、どんどん増大する点で氷とちがう。第 3 図(B)に示した微量の NaCl を含む氷の ϵ' が、やはり、低周波域で周波数の減少と共に増大しつづけた。それ故、積雪においてみられる純粋な氷とのちがいが、積雪が含んでいるいろいろな不純物によるものと考えてよい。実際に、この新雪をとかしたら、その水のなかに煤塵やいろいろの塵芥がたくさ

んみられた。従つて、いろいろの種類の塩類もかなりとけていることであろう。この雪水の塩素イオン濃度を測定してみたが、15.28mg/lであつた。

第4図の(B)図は、(A)図をもととして画いた Cole-Cole 図形、すなわち、新雪の複素誘電率 $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ を ω をパラメーターとして画いた図である。曲線(I), (II), (III)はそれぞれ(A)図の曲線 (I)―(1), (II)―(2), (III)―(3)にあたる。純粹の氷の Cole-Cole 図形は、第3図(c), (c')に示したとおり、ほぼ完全な半円であつたが、こゝに示した新雪の図形では、左半分の高周波側では、ほぼ規則正しい円弧になつているが、右半分の低周波側では円弧から外れ、上の方にのびている。前に述べたとおり、Debyeの導いた式、(7), (8)あるいは、それに類似の関係が成立せば、Cole-Coleの図形は半円になる。こゝで、便宜のため、Cole-Cole 図形が円弧を示す場合を“正常”とよぶことにすると、新雪の複素誘電率は、高周波域では正常であるが、低周波域では正常でないことになる。各の曲線 (I), (II), (III)が半円から外れてゆく部分は、だいたい、それぞれの ω_{\max} 以下の周波数域にある。(ω_{\max} は ϵ'' が極大値をとる周波数) この ω_{\max} 以下の異常は、積雪のなかに不純物として含まれている塩類のためと考えられる。塩類が解離して生じたイオンが、 ω_{\max} 以下の低周波では電場によつて移動してイオン電流を生じ、そのため ϵ'' が純粹な極性物質の場合に比べて大きくなるのであろう。正常な極性物質では、誘電体損失 ϵ'' は、完全に誘電的なもので、電気伝導による損失を含まないが、積雪では、イオンによる伝導損失があつて、それがみかけの ϵ'' を異常に大きくするのである。実際、1節の(2)式からわかるとおり、電気伝導度 σ_s をもつた誘電体では、 $\omega \rightarrow 0$ になれば、 ϵ'' は ∞ になるわけである。Cole-Cole 図形が、 ω が小さくなるにつれ、円から外れて急激に大きくなつてゆく有様は、この性質を十分にあらわしているとみてよいであろう。また、(A)図の曲線(2)のあらわす ϵ'' は、もしこの積雪が純粹であつて、正常な誘電損失だけをもつならば、点線Pで示したごとく、 $\log \omega$ に対して対称になる筈である。ところが、低周波では、不純物の電気伝導による損失Qが加わつてくるために、 ϵ'' は全体としてPとQを加えた曲線(2)となり、低周波になるに従つて大きくなると考えられるのである。

以上の考えを正しいとすれば、吾々は、Cole-Cole 図形により、次のようにして、不純物を含まないときみなしたときの積雪の $\epsilon_0, \epsilon_\infty$ を求めることができる。すなわち、積雪の Cole-Cole 図形は、その左半分が円弧であるから、この部分を一部としてふくむ半円を完成し、その半円と横軸との交点の ϵ' の値を $\epsilon_0, \epsilon_\infty$ とするのである。第4図の曲線についていえば、P, Q, Rが ϵ_0 であり、P', Q', R'が ϵ_∞ である。このようにしてきめた $\epsilon_0, \epsilon_\infty$ は実際の積雪を構成している氷が、純粹な氷であつたとした場合の値であるから、これと前章でのべた純粹で均質な氷の $\epsilon_0, \epsilon_\infty$ とを比較することにより、積雪の構造とその誘電率との関係を調べることが出来るわけである。さきほど、不純物の影響はとりのぞいて考えることができると述べたのはこのことである。

第4図の曲線は、三つとも同じ雪で、たゞ圧縮によつて密度を変えたものであるが、これについて、上の方法で ϵ_0 , ϵ_∞ を求めてみる。第1表に示したごとく、 ϵ_0 は3.1, 4.8, 9.5 となり、 ϵ_∞ は1.15, 1.25, 1.48 となつた。いま、積雪の全容積のうち、氷の粒が占めている容積の割合を p とすれば、空気の占める容積の割合は $(1-p)$ である。 p は積雪の密度 ρ を氷の密度 0.92 で割つた値である。 p の同じ雪でも、その構造により誘電率はちがうが、Wiener の理論によれば、ある與えられた p の値をもつた積雪がとりうる最大の誘電率は、氷と空気との誘電率の算術平均

$$\bar{\epsilon} = p\epsilon_i + (1-p)\epsilon_a$$

であることは、すでに述べた。こゝに ϵ_i , ϵ_a は夫々氷及び空気の誘電率をあらわす。第1表には、 $\bar{\epsilon}$ の値及び、それと雪について実測した値との比 $e/\bar{\epsilon}$ も、静電誘電率については0、光学誘電率については ∞ を添字にして示してある。たゞし氷については $\epsilon_0=80$, $\epsilon_\infty=3.4$, 空気については $\epsilon_0=\epsilon_\infty=1$ として計算した。

第4図(A)の曲線(1), (2), (3) から誘電体損 ϵ'' の極大をあたえる周波数 ω_{\max} を求めてみると、それぞれ、38kc, 29kc, 20kc となる。この積雪と同温度 -1.0°C の純粋な氷の ω_{\max} は 7.6kc であるから、積雪の ω_{\max} は何れも氷に比べて高周波域にある。この ω_{\max} を用いて(12)式より緩和時間を求めて第1表に示した。密度が大きくなるほど積雪の緩和時間は長くなり氷のそれに近づいてゆく。(表の中で τ_i は氷の緩和時間をあらわす) しかして、Wiener の考えによれば、おなじ雪をたゞ圧縮して p を変えたものについては、形数に大きな変化がない筈である。このことについては、別にあとで論ずる予定である。

(ii) 新雪(ぼたん雪, ぬれ雪) — 第5図 —

第5図(A)は気温が $+1.8^\circ\text{C}$ のとき、ふつてきたぼたん雪の周波数特性である。ぼたん雪は、多くの微水滴、すなわち、雲粒をつけた雪の結晶が互にくつつきあつて、大きな雪片となつたもので、水分を含んだぬれ雪である。この雪をなるべく一様な密度になるように蓄電器につめ、極板をさしこんで直に誘電率を測つた。蓄電器につめたときの平均密度 ρ は 0.38 で、塩素イオン濃度 25mg/l, 雪の温度は 0.0°C であつた。(I), (1) がその ϵ' , ϵ'' の曲線である。 ϵ' は 1kc で 70 という大きな値をとり、周波数が増すと共に急に小さくなつて、300kc 以上でやつと一定値になる。同時に ϵ'' も低周波で異常に大きな値をとり、周波数が増すと共に急に減つてゆき、 ϵ'' の極大はみられない。つぎにこの試料を測定終了後、直に低温室に入れ、 -9.0°C で完全に凍結させてから、再び ϵ' , ϵ'' を測定してみると、曲線(II)及び(2)となつて、試料がぬれていたときに比べて ϵ' , ϵ'' ともに小さくなつた。

次に両方の測定値から、それぞれの複素誘電率を画いてみると、同図(B)のようになる。曲線(I)は、ぬれていたときのもの、曲線(II)は -9.0°C で凍結させたときのものである。何れも円弧をなす部分が短かいから、あまり正確な値は望めないけれども、これから半円を完成して、 ϵ_0 , ϵ_∞ を求め、第1表に示した。 p の値は 0.41 である。水分を凍結させても p は

変らない。pの値を0.41として計算した $\bar{\epsilon}$ 、 $\epsilon/\bar{\epsilon}$ の値も表に書き入れた。ただし、このpの値は、積雪の密度0.38を氷の密度で割つたもので、凍結させた試料IIについては正しい。しかし、ぬれ雪の試料Iでは、氷の一部が氷よりも密度の大きい水になつているから、pの値は0.41よりは小さい筈である。しかし、水分はそれほど大きいとは思われないうし、氷と水との密度の差も小さいから、Iの場合に対しても、 $p=0.41$ を使つても大きな間違ではない。

静電誘電率は、氷でも水でもともに80であるから、第1表の $\bar{\epsilon}_0$ の値は、ぬれ雪についても正しいわけである。しかし、ここに用いている1000kcあたりの周波数では、氷の誘電率は $\epsilon_\infty=3.4$ であるが、水の誘電率は80であるから、ぬれ雪の ϵ_∞ の値は表の値よりは大きい筈である。このために、 $\epsilon_\infty(=4) > \bar{\epsilon}_\infty(=1.98)$ という矛盾があらわれているわけである。しかし、この矛盾は、逆にこれを利用して濡めつた雪の誘電率 ϵ_∞ を測定することによつてそのなかに含まれている水の量を求める可能性を示唆している。(これについては、後に12節においてくわしくのべる)。

(iii) 不純物を含まない積雪 一第6図一

天然にふつてくる雪は、空気中に浮遊しているいろいろな微粒子を、その雪片に附着させて落下してくる。地上に積つてからも、風によつて運ばれてくるいろいろな種類の塵芥、煤煙等を取りこむ。それ故、都市及びその附近に積る雪は、多くの不純物を含み、これらの不純物が積雪の誘電率に大きな影響をあたえることは、うへの2例で明らかな通りである。それで次のようにして、全く不純物を含まない純粋な積雪を作つて、その誘電率を測定してみた。

縦、横30cm×30cm、高さ50cmの木箱をつくり、底に電熱線を浸した蒸留水の器をおき、箱の上部は金属板でふたをして、 -20°C の低温室に入れる。電熱線を加減して水温を $+20^\circ\text{C} \sim +30^\circ\text{C}$ 位に保つておくと、やがて金属板の裏側に霜が凝結する。これらをかき集めると、ほとんど不純物を含まない。化学的に純粋な人工雪が得られる。第6図は、このようにしてつくつた純粋な積雪について測定した結果である。温度は -8.5°C 、密度は0.29であつた。図のように、 ϵ' は不純物を含んだ天然の雪のように、低周波域において特に大きくなるということはない。そして周波数が増すと共に異常分散して100kc以上で一定となる。また、 ϵ'' は ϵ' の分散域で、明瞭な極値を示して周波数と共に小さくなつてゆく。Cole-Cole図形は、ほとんど完全な半円で、不純物を含んだ積雪のごとく、円弧から大きく外れることはない。第1表に示した誘電特性をみると、 ϵ_0 は $\bar{\epsilon}_0$ の26%にしか達しないのに、 ϵ_∞ は $\bar{\epsilon}_\infty$ の94%であつて、 ϵ_∞ の達し得る上限値に近い。緩和時間 τ は同温度の氷に比べて短かいが τ/τ_1 の値0.5は、不純物を含む新雪の値に比べては1に近い。

(iv) 粉雪 一第7図一

第7図は劇しい吹雪のあと、吹溜りにたまつた細かい粉雪の誘電率である。このような粉雪の粒子は小さくて顕微鏡でのぞいてみると、直径が0.1mm~0.5mm位のものが多い。密

度は 0.22, 雪温は -2.8°C であつた。この試料も塩素イオン濃度にして 21mg/l の不純物を含んでいるために, ϵ' は低周波で大きくなり, 分散域は 300kc 附近にまでつづく。また ϵ'' も低周波で大きく 50kc 附近で極値を示し, 高周波になると共に小さくなつてゆく。 ϵ_0 の実測値は, 上限値 $\bar{\epsilon}_0$ の 48% に過ぎないが, ϵ_{∞} はほとんど $\bar{\epsilon}_{\infty}$ に等しい。また緩和時間 τ は同温度の氷の τ のほゞ $1/10$ 程度である。

(v) ざらめ雪 一第 8 図一

第 8 図は, 積雪層を深くほり下げて, ざらめ雪の層を切りとり, そのまゝ形をくずさないで蓄電器につめて測定した結果である。このざらめ雪は, 氷粒の直径が約 $2\sim 4\text{mm}$ 位, 密度は 0.41, 塩素イオン濃度は 12.5mg/l , 雪温 -4.0°C であつた。曲線 (I), (1) は雪を蓄電器につめてから, 時間をおかないで, すぐ測定したときの ϵ' , ϵ'' の特性曲線で, (II) 及び (2) は同じ蓄電器を, 温度を一定に保つて 1 日放置した後で測定した ϵ' , ϵ'' である。温度は一定に保たれているにもかかわらず, 時間がたつと共に ϵ' , ϵ'' は増える。そしてその増え方は低周波ほど著しい。 ϵ_0 は一晝夜のうちに 13 から 17 とふえたが, ϵ_{∞} は 2.05 であつて変らない。 ϵ'' の極大値も一晝夜のあいだに増え, その極値をとる周波数は, 最初 23kc であつたものが一日たつと 17kc と, 周波数が低くなつた。すなわち, 緩和時間 τ でいえば最初 $6.9 \cdot 10^{-6}\text{sec}$ であつたものが, 1 日たつと $9.3 \times 10^{-6}\text{sec}$ となつて長くなつたのである。このように, 誘電率や緩和時間が, 温度一定のもとで, 時間がたつと共に変化してゆく現象を“積雪の誘電特性の時間的変化”とよぶことにする。このような時間的変化がおこるのは, 時間がたつとともに, 氷粒と氷粒, 氷粒と蓄電器の極板との間に氷橋が形成されて相互の連結が緊密になつてゆくためである。

(vi) かたしまり雪 一第 9 図一

第 9 図は, 積雪の最下層にあつた粒の細かいかたしまり雪を掘りだして測定した結果である。密度は 0.4, 塩素イオン濃度 35mg/l , 雪温 -3.0°C であつた。曲線 (I), (1) はゆきを蓄電器につめて, 直に測定したもので, 曲線 (II), (2) はそれから, そのまゝ 1 日放置して再び同じ温度で測定したものである。うへのざらめ雪と同様, この試料でも時間がたつと共に, ϵ' , ϵ'' は充填直後の測定値よりも大きくなり, ϵ''_{max} の直及びその極値をあたる周波数 ω_{max} が低周波側にずれてゆく。また, 時間的変化を示すのは, ϵ_0 だけであつて ϵ_{∞} はほとんど変化しない。

以上新雪, ぼたん雪, 粉雪, ざらめ雪, かたしまり雪など, 性質のちがう代表的な積雪について観測した誘電的性質を要約してみると, 誘電率は, 氷と同じく可序周波数からラジオ周波数の範囲内で異常分散を示すが, 特に低周波域で異常に大きな値を示す点で, 純粹でかつ均質な氷の場合とちがう。このため, 複素誘電率の周波数特性を示す曲線 (Cole-Cole 図形) は, 低周波域で円弧を示さない。しかし, 低温実験室で水蒸気を凝結させて人工積雪をつくり, それについて測定してみると, このような異常はみられなかつた。この人工雪には, 不

純物はほとんどふくまれていないが、実際の積雪はかなり多量の不純物を含んでいて、積雪をとかした雪水の塩素イオン濃度は、1ℓにつき数mgから数十mgまでの値を示す。それで、積雪にみられる上記の異常は不純物によるものと結論される。

積雪の誘電率は、氷と空気との誘電率とによつてきまる筈で、その間の関係をもとめるのがこの論文の主な目的である。ところが、氷の誘電率は、純粋な氷についてのみ知られている。それで、実際の積雪についても、それを作っている氷が純粋な氷であつた場合の誘電率を求めなければならない。幸い、 ϵ' と ϵ'' との関係をあらわす Cole-Cole 図形の約半分の長さが円弧になつていたので、これを延長して半円を完成し、この半円を積雪の氷が純粋であつた場合の Cole-Cole 図形と考えた。そして、この図形から静電誘電率 ϵ_0 、光学誘電率 ϵ_∞ を求めその値を第1表にかゝげた。

積雪の全容積のうち、氷が占める容積の割合を p とすると、 p がおなじでも粒子構造によつて誘電率 ϵ はかわる。しかし、 ϵ のとりうる最大値は、 $\bar{\epsilon} = p\epsilon_i + (1-p)\epsilon_a$ (ϵ_i : 氷の誘電率、 ϵ_a : 空気の誘電率) に等しいことが Wiener によつて証明されている。表には $\bar{\epsilon}$ も示してあるが、たしかに ϵ は $\bar{\epsilon}$ より小さい。但し、 $\epsilon/\bar{\epsilon}$ の値は、周波数によつて異なり、 $\omega=0$ の場合の $\epsilon_0/\bar{\epsilon}_0$ は1に比べてはるかに小さいのに、 $\omega=\infty$ における $\epsilon_\infty/\bar{\epsilon}_\infty$ は1に近い。

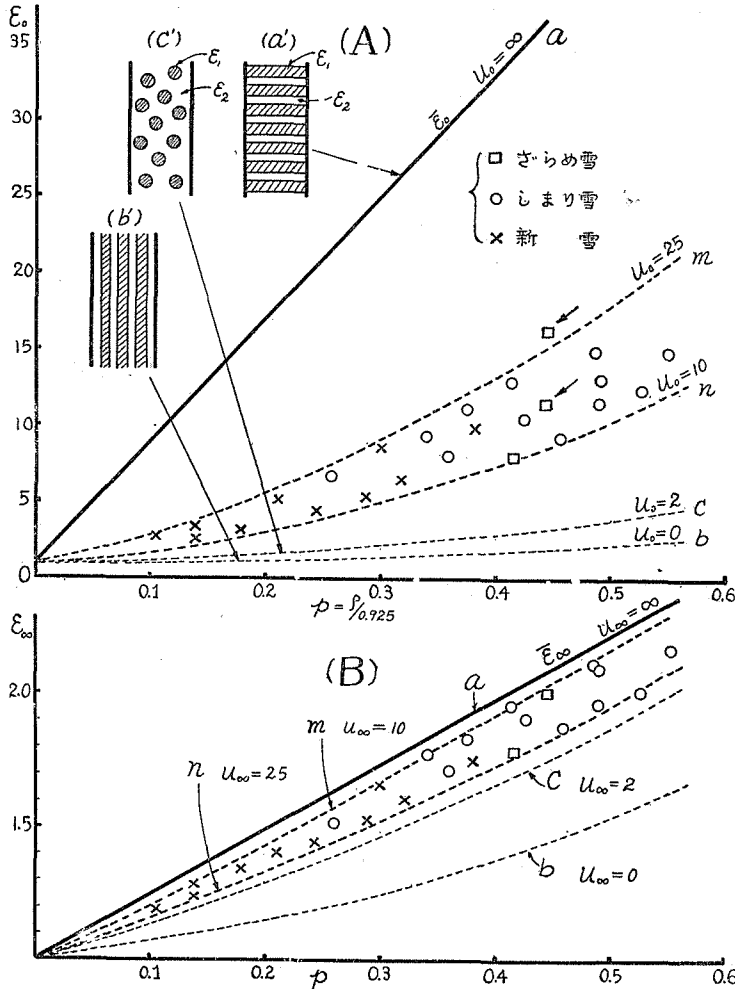
だいたいにおいて、 ϵ は積雪の密度 ρ が大きいほど大きくなる。しかし、おなじ雪でも時間がたつと、 ρ には変化はないのに ϵ は増大する。これは時間がたつにつれて、雪のなかの氷の粒のあいだに、それを連結するように氷の橋が成長してくるためと考えられる。このことについては、更に、9節でくわしくのべることにする。

なお、誘電率に関する緩和時間 τ も求めて第1表に書き入れた。積雪の緩和時間は同じ温度における氷の緩和時間に比べて短い。たとえば、不純物を含まない純粋の積雪で氷の約1/2、不純物を含むしまり雪で約1/10位である。しかし、同じ雪については、時間がたつと共に次第に長くなつて時間的变化を示すのである。

7. 積雪の密度と誘電率

前節で、新雪、しまり雪、さらめ雪などについての誘電特性を示したが、これらは、それぞれの雪の代表的なものについてのものであつた。おなじしまり雪に属するものでも、実際には、一つ一つ特性が少しづちがう。筆者は、各種類の雪について、たくさんの資料をとつたので、この節では、その結果をまとめて論ずる。

第10図(A)及び(B)は、気温 $0.0^\circ\text{C} \sim -10.0^\circ\text{C}$ の範囲において、北大低温科学研究所構内に積つたいろいろの積雪について求めた ϵ_0 、 ϵ_∞ の値と、 p (積雪粒子の占める容積の全容積に対する比、すなわち、積雪の密度を氷の密度 0.92 で割つた値) との関係を示す。新雪、さらめ雪、粉雪、しまり雪等いろいろの種類積雪についてその測定値を含み、それらをちがつた印であらわしてある。また、自然に積つたまゝの密度のもの、人為的に密度を変えて測定したものも含んでいる。これらの雪の塩素イオン濃度は、 $5\text{mg/l} \sim 40\text{mg/l}$ の程度である。



第 10 圖 積雪の密度と誘電率との関係

ただし、全測定値は、雪を測定用蓄電器につめてから、時間をおかないで直に測定したものばかりである。

(A)図、(B)図は、それぞれ ϵ_0 、 ϵ_∞ に関するもので、両図において直線 a はともに、積雪が混合誘電体としてあたえられた p に対してとりうる誘電率の上限値、 $\bar{\epsilon}_0$ 及び $\bar{\epsilon}_\infty$ を示す。両図により明らかごとく、 ϵ_0 の実測値はすべて $\bar{\epsilon}_0$ の値の 30~40% の範囲に分散しているが、 ϵ_∞ の実測値は、ほとんど $\bar{\epsilon}_\infty$ の直線にすれすれであつて、 $\bar{\epsilon}_\infty$ の 80~95% 附近にばらついている。したがつて、もし積雪の誘電率と p との

関係をあたえる式が得られたとしても、 ϵ_0 と p との関係を示す式と、 ϵ_∞ と p との関係を示す式とは完全には一致しないであろう。

積雪の性質を規定するのに、密度だけでは不十分で、なおいくつかの量を必要とすることを始めにのべた。通常、密度のほか、しまり雪とかざらめ雪とかいう名称をつけ加えるが第10図から明らかのように、同じ名称、密度をもつた雪でも誘電率は非常にちがう。したがつて、雪の性質を規定する量のなかに、誘電率をつけ加えることは、意味のあることと考へてよいであろう。そして、誘電率と雪の構造とのあいだには、次にのべるような関連がみられるのである。

まえに、5節で混合誘電体についての Wiener の理論についてのべたが、Wiener の導入した形数 u は誘電体が第10図(A)の(a')のような構造をもっているときに ∞ 、(b') のような構

造のとき0, (c')のような構造のとき2であつた。積雪の構造は、近似的ではあるがこの三つを混合したようなものと考えることが出来る。そして、この三者のうちの、どれにいちばん近いかといへば、それはまず(c')とすべきであろう。それで、(c')の場合をいまま少し検討してみよう。

(c')の場合は、球状誘電体が非常にまばらに分散しているときで、すなわち p が小さくて $u=2$ である。 p が大きくなれば u は2よりも大きくなつていく。この場合については Lord Rayleigh⁽¹¹⁾ の理論的計算がある。ただし、球の中心が立方格子点に規則正しく配列されているときについてのものである。すなわち、球形誘電体の誘電率を ϵ_1 、分散媒誘電体の誘電率を ϵ_2 とすれば、その混合系の誘電率 ϵ は、

$$\epsilon = \epsilon_2 \left\{ 1 + \frac{3p}{\frac{\epsilon_1 + 2\epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} - p - 1.65 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \frac{3}{4}\epsilon_2} p^{\frac{10}{3}}} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

であたえられる。また Rayleigh は、円柱状の誘電体1が、電場に対して軸を直角にして、誘電体2の中に分散しているときの混合誘電体の ϵ は

$$\epsilon = \epsilon_2 \left\{ 1 + \frac{2p}{\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} - p - 0.3058 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} p^4} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

になることを証明した。この兩式は、収斂する無限級数のうちの最初の2項をとつたもので $p \ll 1$ とすれば兩式は近似的に

$$\frac{\epsilon - \epsilon_2}{\epsilon + 2\epsilon_2} = p \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} \dots\dots\dots (20)$$

$$\frac{\epsilon - \epsilon_2}{\epsilon + \epsilon_2} = p \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \dots\dots\dots (21)$$

とおくことができる。第2誘電体が空気の時を考えると $\epsilon_2=1$ である。(20)式は、先に得た Wiener の式(15)において $u=2$, $\epsilon_2=1$ とおいたものと一致し、(21)式は $u=1$, $\epsilon_2=1$ とおいたものと同じである。すなわち、第1誘電体が円柱であれば $u=1$ である。すなわち電場に直角な方向に長い構造のものでは、 u は小さいということを示す。

混合誘電体の構造が極めて単純な場合には、 u は、うえのごとく理論的に求めることができるが、積雪のごとく分散粒子の形が不規則で、しかも複雑な分布をしているときの u を理論的に求めることは困難で、実験によつてきめる他はない。それでは、自然の積雪の u はどのような値になるかを次に調べてみよう。

Wiener の式(15)において、誘電体1を氷、誘電体2を空気とすれば、 $\epsilon_2=1$ であるから、式の第2項は消える。 ϵ_1 は氷の誘電率であるから、これに80及び3.4の二つの値を入れると、積雪の誘電率 ϵ_0 , ϵ_∞ は

$$\frac{\epsilon_0 - 1}{\epsilon_0 + u_0} = p \frac{80 - 1}{80 + u_0} \dots\dots\dots(22)$$

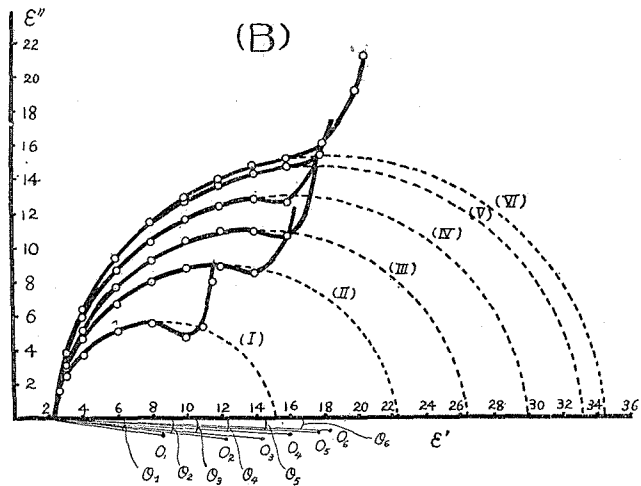
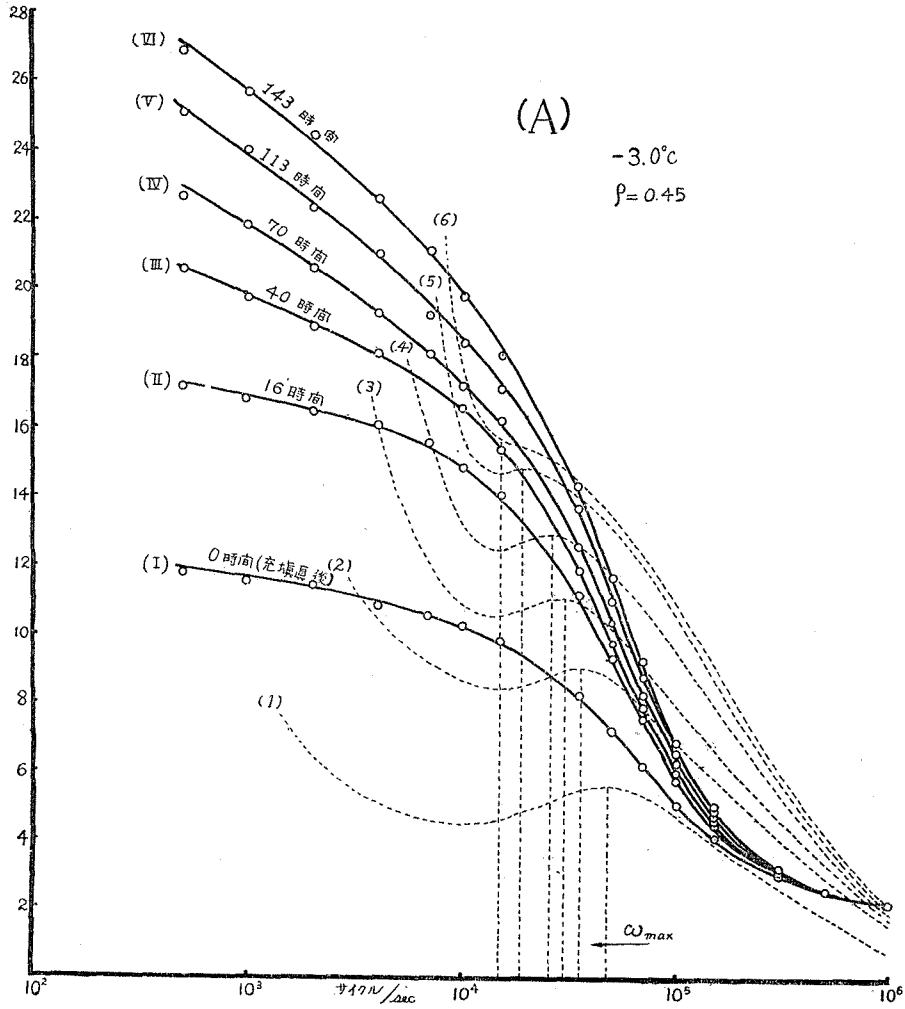
$$\frac{\epsilon_\infty - 1}{\epsilon_\infty + u_\infty} = p \frac{3.4 - 1}{3.4 + u_\infty} \dots\dots\dots(23)$$

となる。ここに、 u_0 は静電誘電率 ϵ_0 に関する形数、 u_∞ は光学誘電率 ϵ_∞ に関する形数である。実測によつて ϵ_0 、 ϵ_∞ を求め上式に入れれば積雪の u_0 、 u_∞ がきめられる。

第10図(A)において、直線 a は積雪がその密度でとりうる誘電率の上限値 $\bar{\epsilon}_0$ を示すことは、すでにのべた。これは氷が柱状 (又は層状) をなして電場の方向に並行にならんだ場合であつて (図a 参照)、 $u_0 = \infty$ に相当する。曲線 (b) は $u_0 = 0$ 、すなわち柱状又は層状の氷が、電場に対して垂直にならんだ場合で (図b' 参照)、 ϵ_0 のとりうる最小値である。このような配列をとるときは、 p が増しても誘電率はほとんど増加しない。曲線 C は、 $u_0 = 2$ の場合の曲線である。(図C' 参照) しかし、実測した ϵ_0 の値は、図のごとく、 $\bar{\epsilon}_0$ の30~40%の範囲内に散らばつてゐるが、これらの測点は (22) 式において、 $u_0 = 25$ 、又は $u_0 = 10$ とおいて得られる二つの曲線、m、n の間にはさまれる。すなわち、筆者が実測したいろいろな種類の積雪の ϵ_0 に関する形数 u_0 は 10~25 の範囲にあるわけである。同様にして、 ϵ_∞ の値は、第10図 (B) にみられる通り、(23) 式において、 $u_\infty = 10$ 、 $u_\infty = 2.5$ とおいて画いた2本の曲線 m、n の間に分散している。換言すれば、実測した積雪の ϵ_∞ に関する形数 u_∞ は、2.5~10の範囲にある。

うえにのべた通り、積雪の性質をきめるには、新雪とか、しまり雪とかの名前と、密度とを使うのが普通である。もしも、名前と密度とによつて、積雪の性質がきまるものならば、第10図において、たとえばしまり雪の誘電率の値をあらわす○印は、1本の曲線にそつて分布するはずである。何となれば、誘電率もまた積雪の性質によつて一義的にきまるものだからである。図のように、おなじ p をもつしまり雪でも、誘電率にちがいがおこるということは、逆に、名前と密度と誘電率とを興えれば、名前と密度ととだけを興えた場合よりも、積雪の性質が一層よくきめられることを示すわけである。そして、こゝにみられるように、誘電率の値が、形数 u が一定な二つの曲線の間におさまることから考えると、誘電率そのものよりも、形数を興える方が適當のように思われる。

第10図で、新雪、しまり雪、ざらめ雪の誘電率を示す、+印、○印、□印は入り交つて分布している。したがつて、ある名前の雪は形数が大きいとか、小さいとかいうことはないわけである。おなじ名前の雪でも、時間がたつと、 p には変化がないのに誘電率は変り、したがつて形数も変つてゆく。たとえば、前節の(V)に説明したざらめ雪であるが、この雪は $p = 0.45$ であつて、 u_0 は最初 22 であつたが、温度を一定にして、1日放置したあとでは、 u_0 は32に増加した。(これは、第10図、Aにおいて矢印で示してある) したがつて、形数 u が積雪の性質を定める一つの量として使われるときに、それがもつ意味をはつきりさせるためには、 ϵ や u が時間的にどのように変化してゆくかを調べておく必要があるであらう。



第 11 圖 積雪の誘電率の時間的変化

8. 積雪の誘電特性の時間的变化

6節の v 及び v_i において、積雪を蓄電器につめて直に測定した値と、それから約1晝夜放置しておいて測定した値とを比べると、温度及び密度が一定に保たれているにもかかわらず、 ϵ_0 は大きく増え、 ϵ_∞ はほとんど変化せず、かつ緩和時間は長くなつてゆくことをみた。このような積雪の誘電特性の時間的变化は、積雪の粒子のあいだをつなぐ氷の橋の成長に密接な関係があり、積雪の誘電特性としては甚だ重要な現象である。この節では、このことに関して行つた実験結果をのべ、実験結果の意味は次の節で述べることにする。

かたしまり雪の塊を積雪層から切り出してきて、金刷毛で氷の粒をかき落して細かい粉末にする。これを蓄電器につめて、直に誘電率の周波数特性を測定する。こうすると、氷粒と氷粒、氷粒と極板の連結が極めて小さいときの誘電特性がまず得られる。ついで、蓄電器を -3.0°C の恒温槽に入れ、温度を一定に保つて、一定時間が経過する毎に、誘電率の変化を測つた。この試料の平均密度は0.45、雪温 -3.0°C 、塩素イオン濃度は44mg/lであつた。

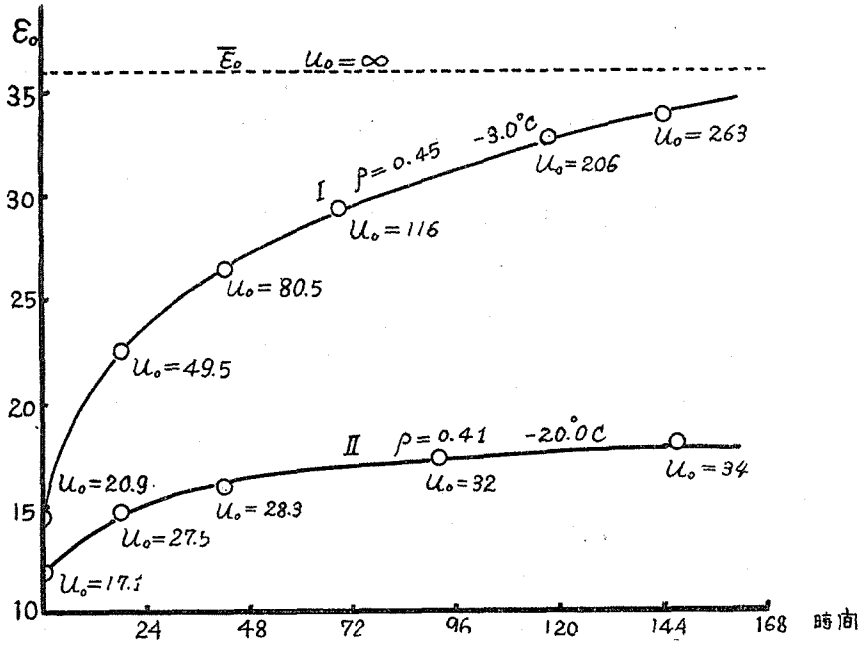
(i) ϵ_0 の時間的变化

第11図(A)の曲線(I)及び(1)は、雪を蓄電器につめて、直に測定した ϵ' 及び ϵ'' の周波数特性である。そして曲線(II), (III), (IV), (V), (VI)及び(2), (3), (4), (5), (6)は最初の測定から、夫々、16時間、40時間、70時間、113時間、143時間経過したのちの ϵ' , ϵ'' である。図のように、 ϵ' は高周波ではほとんど変化しないが、低周波では時間がたつと共に増加し、その増加の割合は、周波数が低くなるほど著しい。 ϵ'' も低周波で大きくなるが、 ϵ' とちがつて高周波域でもかなりの増加を示している。これらの変化は、第11図(B)のCole-Cole図形を画いてみると、一層明瞭になる。円弧(I)は充填直後の値、(II), (III), (IV), (V), (VI)は、それから夫々うえにのべた時間だけ経過したときの变化である。そして、 O_1, O_2, \dots, O_6 は各円弧の中心を示す。これらの円弧が ϵ' 軸を切る点から、それぞれの $\epsilon_0, \epsilon_\infty$ を求めてみると、 ϵ_0 は第12図に示したように時間がたつと共にふえてゆくことがわかる。これに反して、 ϵ_∞ は最初の値2.1を143時間たつた後でもほとんど変えない。

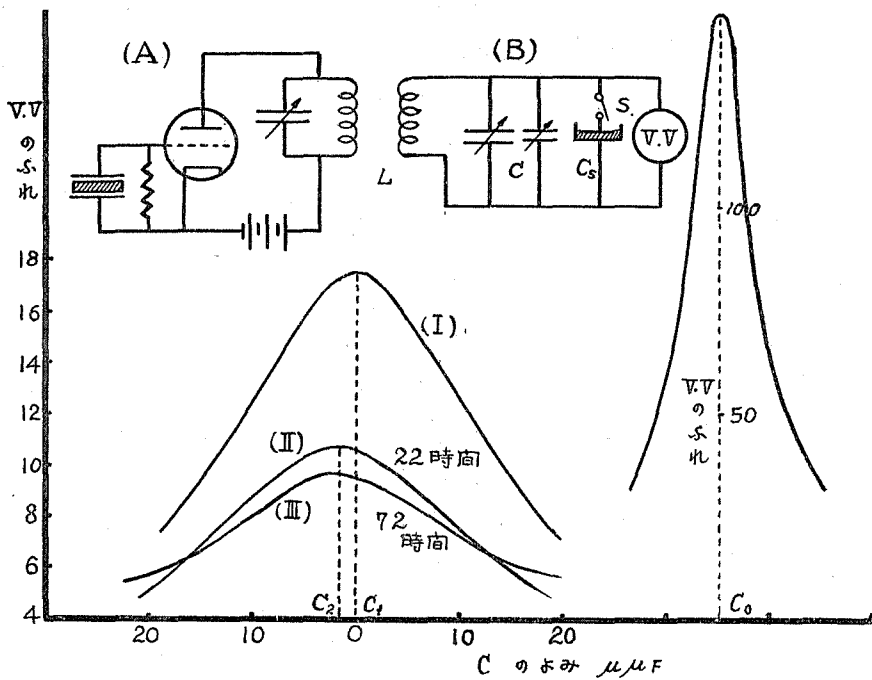
第12図の曲線(I)は、経過した時間を横軸に、 ϵ_0 を縦軸にとつて、時間的变化を示したものである。 ϵ_0 は時間がたつと共に、この雪がとりうる誘電率の上限値 $\bar{\epsilon}_0=36$ にだんだんと近づいてゆく。このとき、形数 u_0 もおなじ図に書き入れたように、時間がたつと共に20.9から263という大きな値に増えてゆく。曲線(II)は全く同じ雪を、密度が $\rho=0.4$ になるように蓄電器につめ、温度をずつと低く -20°C に保つて、同じ方法で ϵ_0 の時間的变化を測定した結果である。温度が低い場合には、同じ雪であつても ϵ_0 の増えかたはずつと少ない。 u_0 も最初17.1であつたものが、146時間後に34に増加したにすぎない。

(ii) ϵ_∞ の变化

Cole-Cole図形から求めた ϵ_0 は、うえのごとく著しい変化を示すが、 ϵ_∞ はほとんど変化しない。しかし、この方法で求めた値は、近似的であつてあまり正確ではないから、このこ



第12図 ϵ_0 の時間的变化



第13図 ϵ_{∞} の時間的变化測定装置

とから直に、 ϵ_{∞} は全く時間的変化をしないということとはできない。それで、 ϵ_{∞} に果して変化があるか否かを確かめるために、次のような実験を行った。

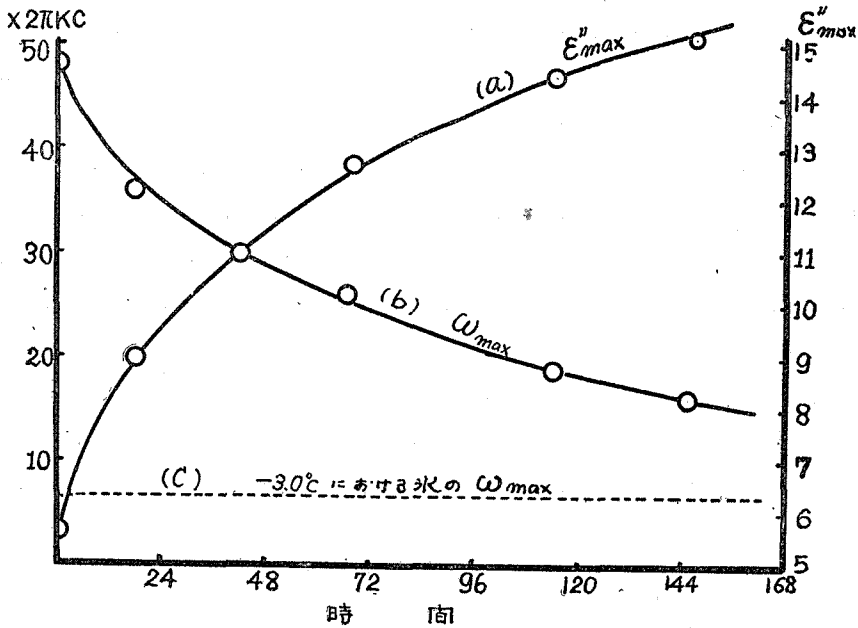
うたと同じ雪を測定用蓄電器につめ、温度を一定に保ち、誘電率の变化を 3483kc の固定周波数で精密に測定してみたのである。これくらいの高周波で測定した誘電率は ϵ_{∞} とみなして差支えない。第13図において、Aは高度に安定な水晶発振器で、Bはこれに粗結合させた測定回路である。Lは同調コイル、Cは 1/20cmまでの容量を正しくよみとり得る精密可変空気蓄電器、 C_s は雪をつめた蓄電器、V.Vは同調回路の誘起電圧を測るための真空管電圧計である。測定の順序は、最初Sを開いておいて、L.C回路だけで電圧同調曲線を取り、その極大をあたえるCのよみ C_0 を求める。次にSをつなぎ、再びCを加減して同調曲線を求め、その極大をあたえるCのよみ C_1 を求める。しかるときは、 $(C_0 - C_1)$ は C_s の電気容量であつて、雪をつめないときの C_s の容量を C_n とすれば、 $\epsilon_{\infty} = C_0 - C_1 / C_n$ であたえられる。このようにして時間の経過と共に、この同調曲線がどのように変化してゆくかを測定した。曲線(I)は、雪を蓄電器につめて直に測定した電圧同調曲線で、曲線(II),(III)はそれから夫々22時間、72時間たつてから測定したものである。図をみると、曲線(I)の極大をあたえるCのよみ C_1 と、曲線(II)の極大をあたえる C_2 の差は僅かに $C_1 \sim C_2 = 1.80\text{cm}$ であつて、誘電率にして $\epsilon_{\infty} = 2.12$ が $\epsilon_{\infty} = 2.16$ に変化したにすぎない。(II)と(III)との極大値をあたえるCのよみは、ほとんど変化しない。このように、 ϵ_{∞} も僅かではあるが変化する。しかし、 ϵ_0 の変化に比べればほとんど無視することができる。しかしながら、電圧同調曲線の山の高さ。すなわち、蓄電器 C_s の端子電圧は、同調回路の結合度には変化がないにもかかわらず、時間がたつと共にだんだんと低くなつてゆく。これは、 C_s の漏洩抵抗がだんだんと小さくなつてゆくことを示している。換言すれば、氷粒同志の結合がよくなつて、雪の実効電気伝導度が増え、誘電体損 ϵ'' が大きくなつてゆくのである。すなわち、 ϵ_{∞} には時間的変化はほとんどみとめられないが、雪の電気伝導度は大きな変化を示すのである。

(iii) τ の 変 化

第11図(A)にみられる通り、 ϵ'' の極値 ϵ''_{\max} は時間の経過と共に増大してゆき、 ϵ''_{\max} をあたえる周波数 ω_{\max} は低周波側に移行してゆく。第14図曲線a, bは ϵ''_{\max} , ω_{\max} の時間による変化を示すものである。 ω_{\max} は時間がたつと共にだんだんと低くなり、同温度 -3.0°C の氷の ω_{\max} に近づいてゆく。すなわち、積雪の緩和時間 $\tau (= 1/\omega_{\max})$ は氷の緩和時間よりも短かくそれが、時間がたつて、粒と粒との間が氷の橋でつながるようになるにしたがい、次第に長くなつて、同じ温度の氷のそれに近づいてゆくのである。

このように、積雪の誘電的性質に関するある量が、時間の経過とともに、均質な氷固有の値に近づいてゆく例は、Cole-Cole図形における角 θ にもみることができる。 θ は、 ϵ_{∞} の点と、円弧の中心とを結ぶ直線が ϵ' 軸となす角であるが、第11図(B)に示した通り、 θ は時間がたつと共に、次第に小さくなつてゆく。しかし、第3図(B)に示した通り、純粹で均

質な氷の θ は非常に小さいのである。実際に、第11図(B)の角度 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6$ を測つて $\alpha = 2\theta/\pi$ を求めると、 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$ は、0.106, 0.086, 0.066, 0.052, 0.037, 0.037 となる。氷の α は 0.036 であるから、時間がたつと共にだんだんと氷の性質に近ずいてゆくことがわかる。



第14圖 $\epsilon''_{max}, \omega_{max}$ の時間的变化

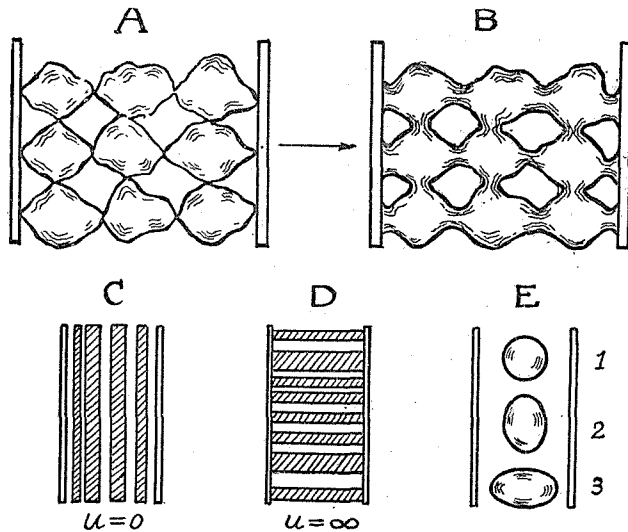
これらの事実は、時間がたつとともに、雪のなかの氷の粒と粒とが氷の橋で連結されて、全体が空間的にたてよこに走る氷の細長い柱の集りのような構造に近づいてゆくものとして説明できる。電場に垂直な方向につながつてゆく氷の柱は、誘電的性質に大きな影響を與えない。それで、電場に平行、あるいはそれに近い状態につながり並んでゆく柱が重要であるが簡単のため、これらの柱の断面は一樣で、みな完全に電場に平行に並んでいるとすると（すなわち、 $u = \infty$ の状態）、氷の柱のなかの電力線は直線をなして柱の軸に平行に走る。測定用蓄電器の間隙を全部均質な氷で満したときに、氷のなかに生ずる電力線の様子と変りはない。したがつて、誘電率の値が、氷そのものの値よりも、 p に相当するだけ小さくなるという点をのぞけば、このような電場に並行にならんだ氷の柱は、全く一樣な氷そのものとおなじ誘電特性を示すはずである。時間がたつにつれて、雪の構造が、水蒸氣の昇華、凝結によつて、うえのような構造に近づくことは、よく知られていることで、誘電特性の上でもそれがよく現われているわけである。時間と共に形数 u が大きくなること、 ϵ_0 が $\bar{\epsilon}$ に近づいてゆくことも、みなこのことと一致している。

9. 誘電特性の時間的変化と氷橋，及び誘電機構

前節で，積雪の誘電率や緩和時間が，時がたつと共に変化することを述べ，その原因を積雪の構造の変化，殊に氷の粒子と粒子とをつなぐ氷の橋の形成に帰したが，この章では，それについて更に考察をすゝめる。

積雪は，氷点以下で一定温度に保つて放つておくと，物理的性質を変えてゆくが，その一つとして，昇華による積雪の質量の減少が考えられる。しかし，この質量の減少は極めて僅かであつて，100~200時間程度では，昇華量は積雪の全質量に比べて無視することができ。たとえ，昇華による質量減少のために誘電率が変化するとしても，それは誘電率の減少として現われるはずである。しかるに，実際には誘電率は大きな増加をするのである。したがつて，積雪の質量変化によつては，誘電特性の時間的変化を説明することはできない。温度が氷点以下であつても，積雪粒子が昇華によつて変形し，粒子との連結状態が変化してゆくことはよく知られている。たとえば，氷粒と氷粒との接觸部は時間がたつと共にだんだんと太くなつてゆく。この現象を氷粒の間に“氷の橋，Ice-bridge”ができるという。この現象は，積雪内部では常に行われていて，所謂“雪がしまる”原因の一つとなつている。氷粒と氷粒とが接觸していると，その接觸部は水の内部からみれば外に向つて凹であり，他の部分は外に向つて凸である。氷粒の表面の水蒸氣圧は凸部の方が凹部に比べて高い。そのため，水蒸氣が接觸部に凝結し，接觸部がだんだん太くなつてゆくものとして，この現象は一般に説明されている。

第11図に示した実験では，蓄電器につめた雪の質量には変化はほとんどない。すなわち， P は一定に保たれたのである。しかし，内部では氷粒と氷粒，氷粒と極板との間に氷橋が成長して，時がたつと共にそれら



のつながりが次第に緊密になつていつたのである。第12図について， u_0 の時間的変化をみると，最初蓄電器に雪をつめたときは $u_0=20.9$ であつたものが，143時間後には $u_0=263$ に増加した。雪を蓄電器につめた直後の状態を模型的に示すと，第15図(A)のごとく，最初は極板と氷粒，氷粒と氷粒とは，ごく僅かしか接觸していない。それが時間がたつと，(B)のごとく，各々の接觸部が太い橋で空間的に

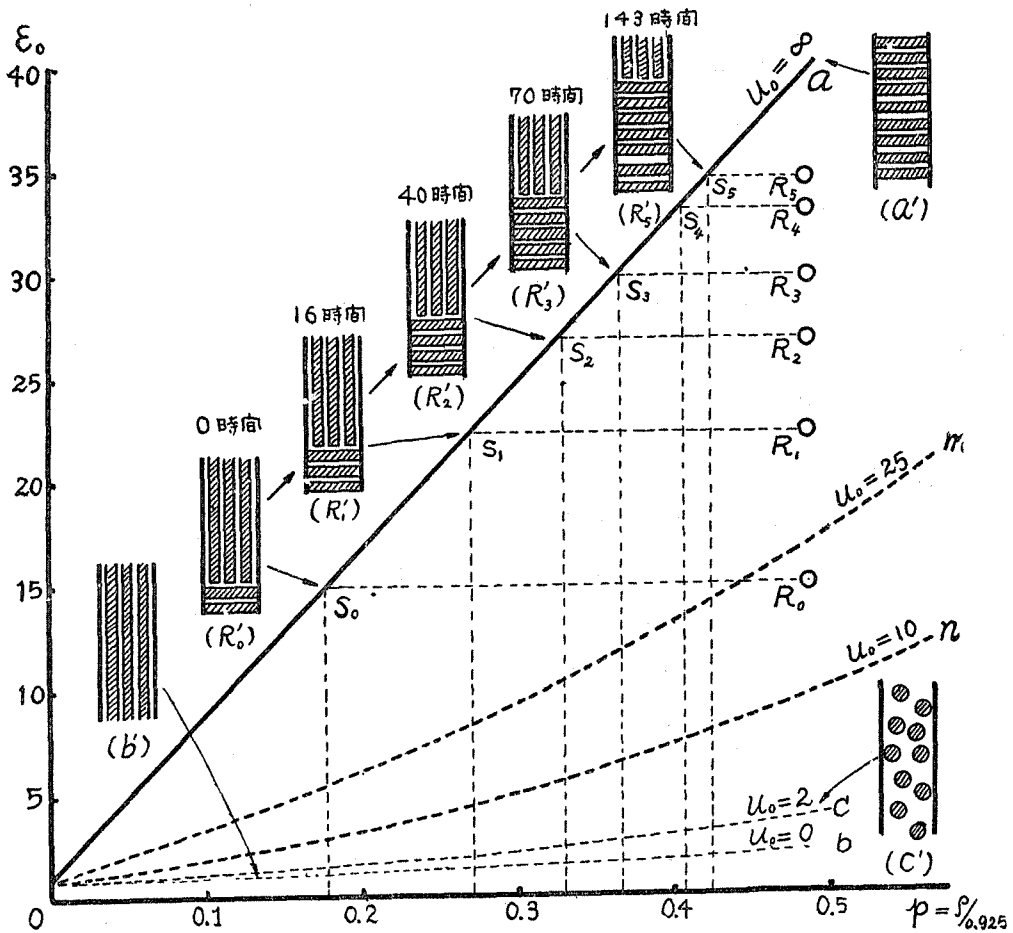
Wiener の 模 型

Sillars の 模 型

第 15 圖 積雪粒子の変化 (氷橋の成長)

つながり、連結は緊密になつてゆく。こゝで電場の方向につながつてゆく氷橋だけをみるとそれは $u_0 = \infty$ の (D) に近い配列に近づいてゆくのであり、この方向の氷橋の増加は、積雪の u_0 を大きくしてゆくのである。しかし、これに反して、電場に対し垂直に、縦につながつてゆく氷橋は、誘電率の増加にはあまり寄與しないであらう。それ故、 u_0 は電場の方向につながる氷橋に比例する量であり、與えられた密度の誘電体がおこす電気変位を、如何に能率よく極板に伝えるかという一つの目安になるものと考えることができる。

第16図は、積雪の密度と ϵ_0 との関係を示すグラフであつて、既に、第10図にかゝげたものである。横軸は密度の代りに $p = \rho/0.925$ を、縦軸には ϵ_0 を示す。一般の積雪の ϵ_0 と p との関係は、同図において m, n なる二つの曲線でかこまれた部分に分布することは既にのべた。この図に、第11図のしまり雪の ϵ_0 の時間的变化をプロットしてみると、この雪の密度は $\rho = 0.45$ ($p = 0.486$)、蓄電器に充填した直後の誘電率は $\epsilon_0 = 15$ 、 $u_0 = 20.9$ であつたから



第 16 圖 誘電的にみた積雪構造の時間的变化

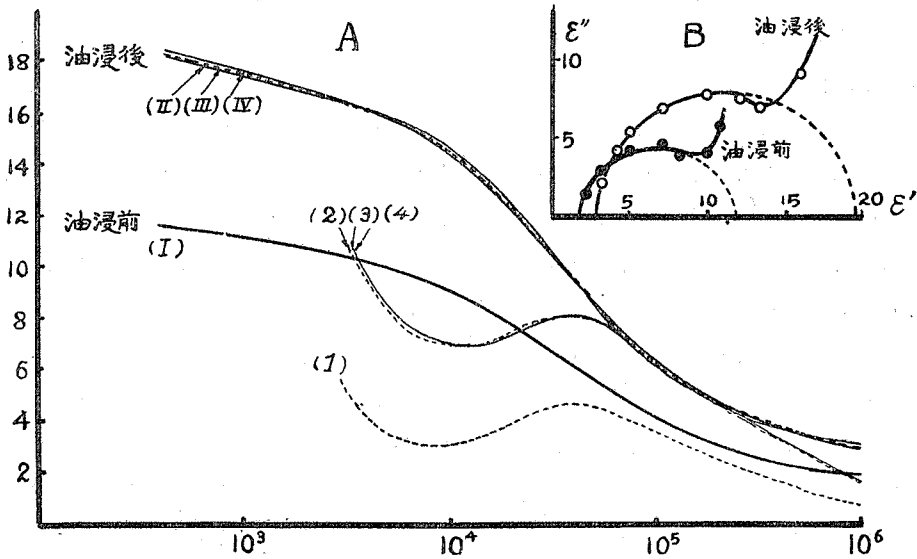
図において R_0 なる点であらわされる。 R_0 を通つて水平線を引き、 a との交点を S_0 とし、 S_0 に対する p を求めると $p=0.18$ となる。 S_0 なる点は、氷粒が (a') のごとく、柱状にすべて電場に平行にならんだとき、 $p=0.18$ に相当する ϵ_0 をあらわす。従つて、 $p=0.486$ の R_0 の積雪は、近似的に、 $p=0.486$ の氷粒のうちで $p=0.18$ だけの氷粒が、 $u_0=\infty$ のつながりかたをしており、残りの $p=0.296$ の氷粒は $u_0=0$ の状態にあると考えても、誘電率の立場からいえば全く等価である。すなわち、誘電率に寄與している氷粒は電場に平行につながつた $p=0.18$ に相当する氷粒だけである。この状態を模型的に示したのが R'_0 である。

時がたつて、16時間後には、 $\epsilon_0=22.5$ 、 $u_0=49.5$ と増えたので、 R_0 は R_1 の位置に移動した。前と同じ手段で R_1 を通つて水平線を引き、 a との交点を S_1 とすると、 S_1 に対する p は 0.273 となる。 S_1 と R_1 との誘電率は相等しい。従つて、時間がたつて ϵ_0 が $R_0 \rightarrow R_1$ に増えたのは、 R_0 のとき寄與しないで残つていた $u=0$ の状態の氷粒のうち、何割かが氷橋でつながり $u_0=\infty$ の状態につながつたと考えることができる。この状態が R'_1 である。以下同様にして、時間の経過と共に、 $u_0=0$ の状態にある氷粒の割合が減り、 $u_0=\infty$ の状態につながつてゆく。その様子を R'_2, R'_3, \dots, R'_6 に示した。天然の積雪の ϵ_0 は、曲線 m, n の間にあるのに、今の場合の ϵ_0 は、この範囲をはるかに外れてしまう。天然の積雪は、新雪から出発して、しだいにしまり雪、ざらめ雪にと変形してゆくが、出発点の新雪の密度は 0.1 あるいはそれ以下の非常に小さい値である。いま、こゝにつかつた雪は、はじめ、氷の粒が互に連結していない点で新雪と同じである。しかし、密度は、新雪に比べてはるかに大きい。それでこれが変形してゆくと、天然の雪にはみられないような大きい ϵ_0 の値を示したのである。しかし変形の経過は、だいたいにおいて、天然の新雪のものとおなじと考えてよいであろう。このように、電場の方向につながつてゆく氷橋の増加によつて、 ϵ_0 は増えてゆくが実際には、氷橋は空間的に四方につながつてゆく。それ故、たとえ時間を無限にかけたとしても、すべての氷粒が (a') の状態になることはあり得ない。従つて、 ϵ_0 の値は、 $\bar{\epsilon}_0$ よりは常に小さいある一定値に近ずいてゆくことになるであろう。

以上は Wiener の模型による説明である。このことがらは、廻転楕円体状の誘電体が、他の誘電体の中に分散した混合系の誘電率についての Sillars の理論的計算の結果からも説明することができる。それによると、第15図 (E) の (2) のごとく、廻転楕円体粒子が、その長軸を電場の方向に垂直にして分散しているときの誘電率は、同図 1 のごとく、球状粒子が分散しているときの誘電率とほとんど大差ない。ただし、 p の値は両方おなじであるとする。ところが (3) のごとく、その長軸が電場の方向にならんだときは、誘電率は、(1) 及び (2) の場合よりも大きくなり、しかも廻転楕円体の長軸と短軸との比、 a/b が大きくなる程、誘電率は増えてゆくことが示される。時間がたつて、氷粒と氷粒とがつながつてゆくことは、1 の状態から 2 と 3 の状態に移つてゆくことに似ている。2 は、誘電率の増加には寄與しないが、3 により誘電率は大きくなつてゆくことが説明される。

“氷橋”の成長が、積雪の誘電率の時間的変化の主な原因であるならば、もし何等かの方法によつて、氷の橋の成長をそ止するならば、誘電率の時間的変化はおこらないであろう。このことを確しかめるために、次のような実験をおこなつた。

まず、第5節に用いたのと同じ雪、すなわち、しまり雪を金刷毛でかきおとし、粉末状にした雪を蓄電器につめて、直に ϵ' 、 ϵ'' の周波数特性を測る。次に、蓄電器全体を予め雪と同温度に冷却しておいた絶縁油のなかに浸す。蓄電器を静かに油のなかに入れてゆくと、油はだんだんと氷粒の間にしみ入り、やがて氷粒と氷粒との間の空間は、すっかり油で置換えられてしまう。このようにして、温度を一定に保ち、長時間放置して、 ϵ' 、 ϵ'' の時間変化を観測してみた。



第17圖 油浸後の時間的变化

第17図にその結果を示す。こゝに用いた積雪の密度は 0.34、温度は -4.0°C 、絶縁油の誘電率は 2.5 であつた。同図(A)の曲線 (I) 及び (1) は油につけない前の ϵ' 、 ϵ'' の周波数特性で、曲線 (II), (III), (IV) 及び (2), (3), (4) は油に浸してから、それぞれ 38 時間、51 時間、70 時間、経過したのちの周波数特性である。油浸後の測定曲線は、三本とも図のごとく、ほとんど一致しており、時間がたつても誘電特性に変化がおこらないことを示している。同図 (B) に表わした Cole-Cole 図形より、 ϵ_0 、 ϵ_{∞} を求めると、

$$\text{油浸前 (I)} \begin{cases} \epsilon_0 = 11.4 \\ \epsilon_{\infty} = 1.75 \end{cases} \quad \text{油浸後 (II, III, IV)} \begin{cases} \epsilon_0 = 19.5 \\ \epsilon_{\infty} = 2.7 \end{cases}$$

となる。

雪の結晶を油に浸して氷点以下に保つておくと、数カ月をたつても変形しないことを、吉田、小島⁽¹⁵⁾が示している。雪の結晶の表面には、細かい複雑な凹凸があるが、それさえも変化

しない。したがって、こゝに行つたように、積雪を油のなかに浸せば、水蒸氣の昇華、凝結はおこらなくなり、積雪の粒子の形は変らず、氷の橋もできないはずである。かくして、積雪の誘電特性の時間的変化が、積雪の構造の時間的変化によつておこることが確認せられたわけである。

積雪の静電率 ϵ_0 、或は ϵ_0 から求められる形数 u_0 と積雪の構造との関係を以上のように、積雪粒子のあいだの結合状態に関連して解釈した。積雪は、しまり雪、ざらめ雪などという種類により、結合状態のみならず、粒子の形、大きさもちがつている。しかし、積雪の性質のうち、実用的に最も重要な機械的性質は、主として粒子の結合状態によつてきまるものと考えられる。したがって、上のように、 ϵ_0 、 u_0 と粒子の結合状態との関連をある程度明かにし得たことは、直接に積雪の機械的性質を測定することの困難なことを顧みるとき、実用上の価値があるものとみることができよう。

ϵ_0 、 u_0 は積雪の性質により、かなり大きく変化するが、 ϵ_∞ 、 u_∞ はあまり大きな変化を示さない。これは、氷の誘電率との比が、周波数の小さいときには、80 という大きな値であるにかゝらず、周波数の大きいときには、その 1/20 にへつてしまうためである。積雪の規定に使うためには、性質によつて大きく変るものの方が便利であるから、そのためには ϵ_∞ でなく、 ϵ_0 の方を当然用いるべきであろう。しかし、測定自身に関しても、周波数の大きいときの方が小さいときよりも容易であり、かつ、 ϵ_0 を決定するためには Cole-Cole 図形を画くために、いくつかの周波数について測定しなければならぬという欠点があるようにも考えられるであろう。けれども、第4図から第9図に示した通り、すべての性質の積雪についてたとえば、 10^4 c/s と 10^5 c/s との二つの周波数について、 ϵ' 、 ϵ'' とを測定すれば、中心が ϵ' -軸上にあると考えて Cole-Cole の半円を書きことができる。したがって、実用問題としての ϵ_0 の決定も測定器を適当に設計することにより、容易に行われるものと考えられる。

この節では、誘電率を積雪の性質の規定に用いようとする立場から、 ϵ_0 についてのみ論じたが、本節及び前節でも度々ふれたように、積雪の誘電的性質については、なお幾多の問題がある。積雪の緩和時間 τ が、氷の緩和時間よりも短いことなども説明を要することがらである。このような点についてはあとで論ずることにする。

10. Wiener の比例要請

混合誘電体に関する Wiener の比率要請 (Wienersches Proportionalitätspostulat) については、すでに5節でのべた。誘電率 ϵ_1 、 ϵ_2 の二つの物質の混合体の誘電率が ϵ であるとき、混合体の構造を全くそのままにして、たゞ、 ϵ_1 、 ϵ_2 を共に n 倍した場合を考えると、混合体の誘電率も ϵ の n 倍になるというのが比例要請であつた。

Wiener は理論的にこの要請をだしたのであつて、しかもその理論には凝念をさしはさむ余地はないようである。しかし、一応は実験によつて確める必要があると考え、雪をつかつて次のようにして調べてみた。いままでのところ、比例要請についての実験的研究はあまり

ないように思われる。

氷の誘電率を ϵ_1 とすると、雪は氷と空気との混合体であるから、誘電率 ϵ_1 の物質と誘電率 $\epsilon_2=1$ の物質との混合体である。この雪を誘電率が α の油のなかに浸すと、雪のなかに油がしみこんで、空気は油で置換され、雪は誘電率 ϵ_1 と α の二つの物質の混合体となる。空気と油との誘電率 1 と α とは、周波数 ω によつて変化しないが、氷の誘電率 ϵ_1 の絶対値は ω によつて 3.4 から 80 にまで大きくかわる。したがつて、適当な周波数 ω' , ω'' を擇べば、

$$\epsilon_1(\omega') = \epsilon_1(\omega'') / \alpha \dots\dots\dots (24)$$

なる関係が成立するはずである。それで、油に浸す前の初めの雪については、周波数 ω' での誘電率 ϵ_a , 油に浸けた雪については ω'' での誘電率 ϵ_b をとることにすれば、比例要請に従つて、

$$\epsilon_b = \alpha \epsilon_a \dots\dots\dots (25)$$

の関係が成り立たなければならぬことになる。

空気にも油にも誘電損失はないので、その誘電率は実数であるが、氷は大きな誘電損失を示し、その誘電率 ϵ_1 は複素数であらわされる。それで、(24)式を満す ω' , ω'' は次のようにして、Cole-Cole 図形をもとにして求めた。

第3図(A)に示したように、蒸溜水を凍らせて作つた氷の Cole-Cole 図形は、

$$\epsilon_1 = \epsilon' - j \epsilon''$$

とすれば、ほゞ中心を ϵ' -軸上におく半円とみなすことができ、この半円の方程式は、

$$\left(\epsilon' - \frac{\epsilon_0 + \epsilon_\infty}{2} \right)^2 + \epsilon''^2 = \left(\frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{2} \right)^2 \dots\dots\dots (26)$$

であたえられる。こゝに $\epsilon_0=85$, $\epsilon_\infty=4$ である。 $\frac{1}{2}(\epsilon_0 + \epsilon_\infty)$, $\frac{1}{2}(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)$ はそれぞれ半円の中心の坐標と半径とであるから、

$$\left(\epsilon' - \frac{\epsilon_0 + \epsilon_\infty}{2\alpha} \right)^2 + \epsilon''^2 = \left(\frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{2\alpha} \right)^2 \dots\dots\dots (27)$$

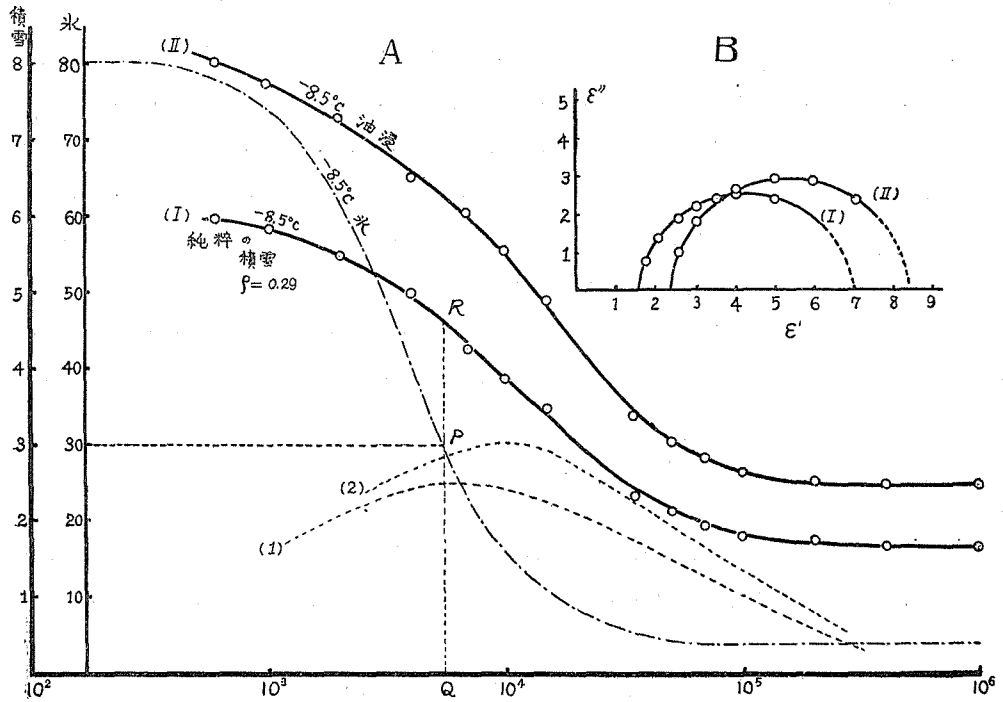
なる円の方程式は、 ϵ_1/α に関する Cole-Cole 図形をあらわす。したがつて、(26), (27)両式を同時に満足する ϵ' , ϵ'' は、(24)式を満足する $\epsilon_1(\omega')$ の実数部と虚数部とになり、その各の値を用いて、第3図(A)より ω' をきめることができる。また、こゝに得た ϵ' , ϵ'' を α 倍したものに相当する周波数を、同じく第3図(A)よりきめれば、それが ω'' となる。

用いた油は変圧器用の油で、誘電率 α は 2.5 であつた。この α を用いて計算した数値を次に示す。

$$\begin{aligned} \epsilon'(\omega') &= 5.35 & \epsilon'(\omega'') &= \alpha \epsilon'(\omega') = 13.37 \\ \epsilon''(\omega') &= 10.37 & \epsilon''(\omega'') &= \alpha \epsilon''(\omega') = 25.92 \end{aligned}$$

第3図(A)の

$$\begin{aligned} \epsilon' \text{ より求めた} \dots\dots\dots \omega' &= 52\text{kc} & \omega'' &= 16\text{kc} \\ \epsilon'' \text{ より求めた} \dots\dots\dots \omega' &= 43\text{kc} & \omega'' &= 15\text{kc} \end{aligned}$$



第 18 圖 純粋な雪を油につけたときとつけないときの誘電特性

第18図は低温実験室でつくった純粋な人工積雪（昇華させた霜をあつめたもの）について油に浸す前と後とで測定した誘電率の周波数特性である。この図と上の二組の ω' , ω'' とから誘電率 ϵ_a , ϵ_b の実数部, 虚数部を求めると,

油 浸 前		油 浸 後	
ϵ_a'	$\left\{ \begin{array}{l} 2.1 \\ 2.2 \end{array} \right.$	ϵ_b'	$\left\{ \begin{array}{l} 4.75 \\ 4.85 \end{array} \right.$
ϵ_a''	$\left\{ \begin{array}{l} 1.43 \\ 1.57 \end{array} \right.$	ϵ_b''	$\left\{ \begin{array}{l} 2.86 \\ 2.90 \end{array} \right.$

である。これの平均をとつて, ϵ_a , ϵ_b を求めると,

$$\epsilon_a = 2.1 - j1.5$$

$$\epsilon_b = 4.8 - j2.9$$

$$\alpha\epsilon_a = 2.5 \epsilon_a = 3.7 - j 3.7$$

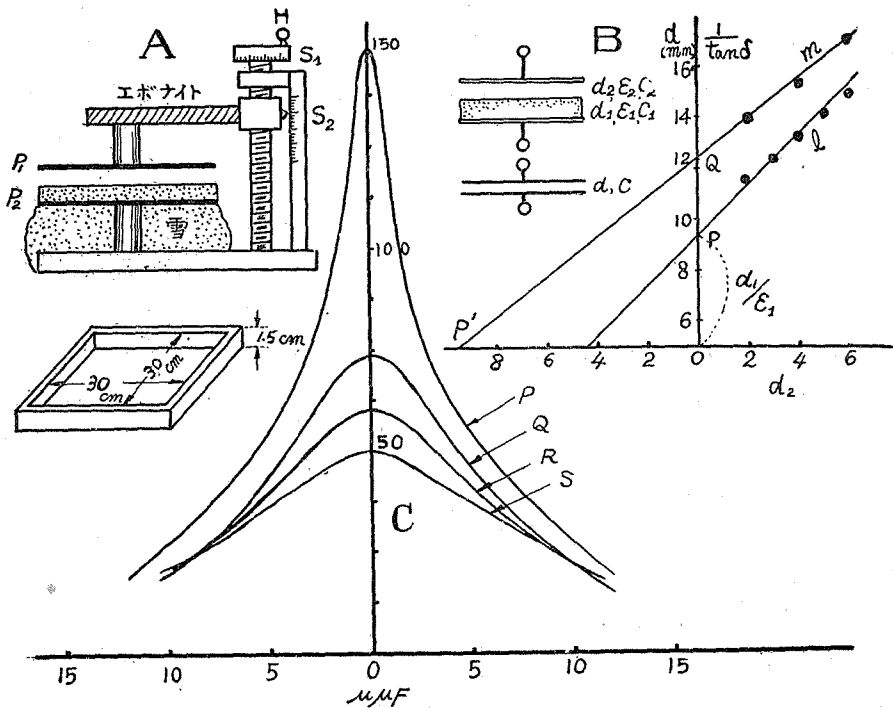
となる。 $\alpha\epsilon_a$ と ϵ_b とがよく一致しているとはいえないが、この程度の不一致は予期されるところである。Cole-Cole の図形をあらわした円の式が、すでに相当の誤差をふくむことは致しかたのないことで、それが e' と e'' とから求めた二組の ω' , ω'' の値の不一致の上に現われている。また、氷は、前にも述べたように、極めて少量の不純物によつても誘電特性に影響をうけるので、蒸溜水で作つた氷と、雪を作つている氷とが全く同じ特性をもつものとは期待できない。これらの点を考えあわせれば、上に得た結果は、比例要請の妥当性を示すも

のと解釈してもよさそうに思われる。

11. 自然状態での積雪の誘電率の時間的变化

8節では、雪を蓄電器につめたまゝ、長い時間放置した場合、誘電率の示す時間的变化を論じた。その時、注意したように、この時の雪の変化は、自然状態での雪の変化とほとんど差異がないと考えられる。しかし差異がないという確かな証拠をあげたわけではないので、念のため、自然状態に非常に近い状態に雪をおいて、誘電率の変化を調べてみた。これまでの実験の状態が、自然状態と違う点は、時間的变化をはかる実験のはじめに用いた雪が新雪でないことと、蓄電器に入れてあるため、直接外氣と接觸している部分が少ないことである。

それで、蓄電器の一方の極板を水平におき、その上に新雪を平らにのせ、他の極板を雪の面からある高さへだてゝ支えるようにして、誘電率を測定した。上の極板と雪の上面との間には、空隙があるので、雪は直接外氣にふれている。したがつて、自然に積つたまゝの状態に近い。このようにして、ふつてきたばかりの樹枝状結晶をした新雪が、氣温の変動によつて、しまり雪、ぬれ雪、となり再び凍つてざらめ雪へと移り変つてゆくときにおこる誘電率、及び誘電体力率の変化を觀測した。



第 19 圖 間隙変化法による誘電率の測定

第19図(A)に、この目的のためにつくつた測定用蓄電器を示す。P₁, P₂は何れも30×30cm²の並行平板電極で、P₁は可動極板、P₂は固定極板である。P₂に測定せんとする雪をのせる。

そして、ハンドルHを廻して、 P_1 と雪の上面との距離 d をいろいろ変えて、電気容量と誘電体力率とを測る。 S_1 S_2 は P_1 の移動距離を 1/20mm まで正しく読むことの出来る遊尺付スケールである。固定電極 P_2 の下側は同じく雪で埋めておく。 Q は、 P_2 にのせる雪の厚さを一様にするために、雪を切りとる木杵を示す。測定せんとする積雪にこの木杵をうめ、上下を水平に切りとり、形をくずさないようにして P_2 の上にのせる。そうすれば、試料として面積が $30 \times 30 \text{cm}^2$ 、厚さ 15mm の雪の板が得られる。この蓄電器では、故意に空隙を設けてあるので、電気容量は小さくなり、低周波数域にわたる測定は困難なので、固定周波数 3483kc を用い、 ϵ_∞ 及びその周波数における誘電体力率 $\tan \delta$ を測定した。

ϵ_∞ , $\tan \delta$ の測定には、所謂“間隙変化法⁽¹⁴⁾”を用いる。積雪の厚さを d_1 、誘電率を ϵ_1 、積雪上面と電極との空隙の厚さを d_2 とすれば、この蓄電器と同じ容量をもつ等価蓄電器（実際の蓄電器と同じ極板面積の平行板空気蓄電器）の間隙の厚さ d は、

$$d = d_2 + \frac{d_1}{\epsilon_1}$$

となる。 d は、測定された電気容量からきめられる。それ故、 d_2 を変化させて電気容量を測り d と d_2 とのグラフをかくと、同図(B)の直線 l のごとくなる。 l と縦軸 (d -軸) との交点 P と、 O との距離 \overline{OP} は d_1/ϵ_1 に等しい。 d_1 は既知なる故、これから積雪の誘電率 ϵ_1 を求めることができる。

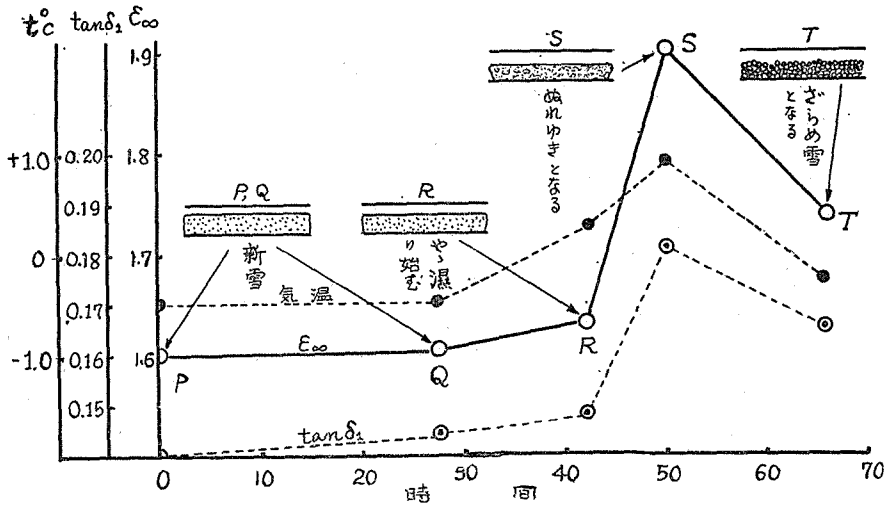
誘電体力率 $\tan \delta$ は次のようにして求める。測定によつて求められる蓄電器の $\tan \delta$ と積雪の $\tan \delta_1$ との間には、

$$\frac{1}{\tan \delta} = \frac{1}{\tan \delta_1} \left(1 + \frac{\epsilon_1 d_2}{d_1} \right)$$

なる関係がある。それ故、誘電率の測定法と同様に、 d_2 をいろいろに変えて $\tan \delta$ を測り、 d_2 と $1/\tan \delta$ とのグラフをかけば、第19図(B)の直線 m となる。 m は次のようにすれば正確にひける。上式から、 m は d_2 -軸上の $d_2 = -d_1/\epsilon_1$ なる点 P' を通るはずである。しかるに、 $OP' = OP$ であるから、 P' は正確にきまる。したがつて、実測された $1/\tan \delta$ を示す各点と、 P' を通る直線を引けばよい。直線 m から縦軸を切る点 Q を求めると、 $\overline{OQ} = 1/\tan \delta_1$ であるから、これにより、積雪の $\tan \delta_1$ を求めることができる。 $\tan \delta_1$ は、リアクタンス変化法により、蓄電器にかかる電圧を真空管電圧計で測つて、電圧同調曲線を描き、その曲線の撓がり測つて計算によつて求めた。第19図(C)の曲線 P は、積雪を入れないで、極板間隙を 2mm にしたときの同調曲線、 Q , R , S は新雪を入れて、 d_2 を夫々 6mm, 4mm, 2mm としたときの同調曲線である。

第20図は、ふつてきたばかりの新雪を木杵につめて、密度 $\rho = 0.32$ 、厚さ 15mm の板とし P_2 の上にのせて、自然の気温の変動と共に雪質が変つてゆくときの誘電率と誘電体力率を測つたものである。

最初の測定 P から、27時間後の Q までは、気温は -0.5°C を保ち、目でみたところ雪質は



第 20 圖 積雪の沈下と誘電特性

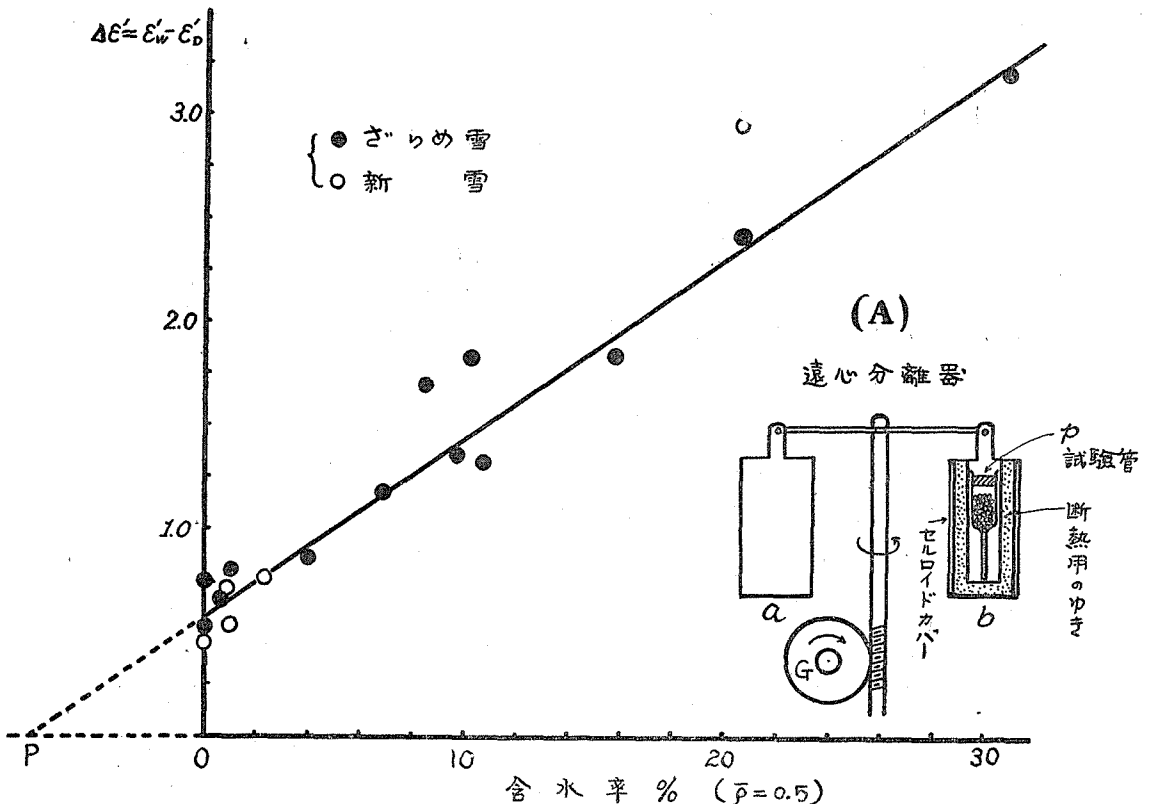
ほとんど変化しなかつた。誘電率 ϵ_{∞} は、1.60 のまゝ変らず、誘電体力率 $\tan \delta_1$ は 0.140 から 0.145 に僅かに増えた。それから、更に、15時間経過した R では、気温が $+0.3^{\circ}\text{C}$ に上つて雪はやゝ濡り始めた。いままで、雪の粒にみえていた結晶形はくずれて、雪はしまり雪となり、雪の板の厚さは 14.5mm になつた。 ϵ_{∞} は増えて 1.63 になり、 $\tan \delta_1$ も 0.147 に増えた。それから、更に、7時間後の S になると、気温は $+0.9^{\circ}\text{C}$ となり、試料は完全なぬれゆきとなつて、厚さは 13mm に減つた。そして端が少しくずれ始めた。こうなると、誘電率は急に増えて 1.95 となり、 $\tan \delta_1$ は 0.181 となつた。更に、それから 16 時間たつた T では、気温は -0.25°C に下つたので、積雪はすっかり凍つて粒の大きいザラメ雪となり、厚さも平均して 12mm になつた。 ϵ_{∞} は 1.74 に減り、 $\tan \delta_1$ も 0.162 に下つた。測定し始めたときは密度が $\rho=0.32$ であつたが、最後のざらめ雪になつてからの密度は 0.4 に増えた。このように、積雪は、新雪の状態からしまり雪を経て、ザラメ雪へと変形してゆくと共に、誘電率や誘電体力率は増えてゆく。また、気温がたかくなつて、雪が濡つてくると、 ϵ_{∞} も $\tan \delta$ も増す。これは、水の ϵ_{∞} は、氷の ϵ_{∞} に比べると約 23 倍も大きいからである。

自然状態では、温度の変化があり、雪の密度も変化して、先にのべた実験の場合に比べると変化は複雑であるが、雪が古くなるにつれて誘電率が增加する様子は、だいたい、8節、9節にのべたことと同じである。したがつて、自然状態においても、誘電率の増加は、主として氷粒と氷粒とをつなぐ氷橋の成長にもなるものであると考えてよいであろう。なお、上の例には、雪が少しとけて、水を含むようになると、誘電率が急激に増し、再び温度がさがつて水が凍ると、誘電率は小さくなるということがみられた。誘電率は、雪が水を含むか否かによつて大きく変る。雪の含水率の測定は、積雪の研究上非常に重大なことから、この点については次節でのべることにする。

12. 積雪の含水率と誘電率

前節で、雪が湿つて水分を含むようになると、誘電率が大きくなることを注意したが、このことは既に、6節においてものべておいた。雪の湿りの度合、すなわち含水率（雪のなかにふくまれる水の%）は積雪の機械的性質に著しく影響する。それ故、含水率の測定法、及び測定装置の完成は各方面から要望せられている。しかし、未だに適当なものはないようである。それで、積雪の含水率と誘電率との関係を調べてみた。もしそのあいだに適当な関係があれば、雪の誘電率を測ることによつて含水率が求められるわけである。

水を含んだための誘電率の変化は、6節の第5図に示したぬれ雪の例のごとく、低周波になるほど著しい。低周波では、氷の誘電率も水の誘電率も共に80に近く、氷の一部が水になつたとしても、誘電率にはあまり大きな差異はでないものと予想される。それにもかゝらず低周波で含水率の影響の著しいのは、低周波では、雪のなかに含まれている不純物の分極による影響が大きくあらわれるためと考えられる。しかも不純物の量は一定しているわけではない。それで、3483kcの高周波を選んで測定した。この程度の高周波では、不純物を含んでいたとしても、その影響は少なく、氷の誘電率は $\epsilon_{\infty} = 3.4$ であるのに、水の誘電率は80であつて、両者に大きな差があるからである。それ故、含水率による誘電率の変化は充分大きく現われる。



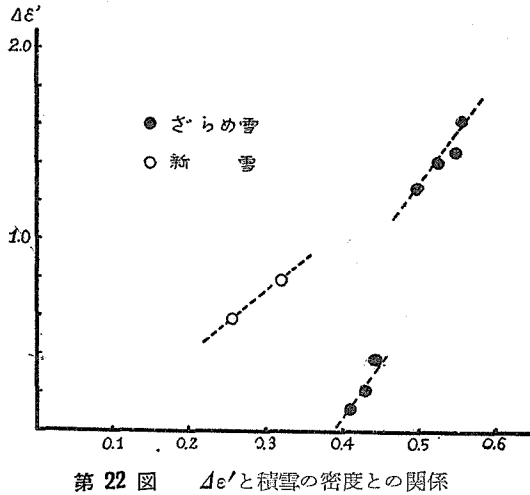
第 21 圖 含水率と $\Delta\epsilon'$ との関係

第21図が含水率と、含水量のために生じた誘電率の増加分 $\Delta e'$ との関係である。 $\Delta e'$ 、及び含水率は次のような方法で求めた。まず、1節の第1図に示したものと同形の蓄電器に、濕つた雪をつめて、 e' を測定する。蓄電器の内容積は $15 \times 14.3 \times 5 = 1073 \text{cm}^3$ で、雪をつめないときの電氣容量は 33cm であつた。このとき得られる誘電率の値を e'_w とする。次にこの蓄電器を -11.0°C の低温室に入れて、雪の含んでいる水分を完全に凍結させて再び誘電率を測る。その値を e'_d とすれば、 $\Delta e' = e'_w - e'_d$ が雪が濕つていたためにふえた誘電率の増加分である。 e'_w は濕つた雪の誘電率で、雪の温度は 0.0°C である。しかるに e'_d は -11.0°C における誘電率であつて、それぞれ測定時の温度がちがう。本来ならば、温度零度において水を含んでいる場合と、乾いている場合との誘電率の差をとるべきである。しかしながら第3図にみられるように、 100kc 以上の高周波における水の誘電率は、温度には無関係にほとんど一定であるから、 e'_d は完全に凍つてさえおれば低い温度で測定してもよい。

含水率は同図(A)に示したような遠心分離器⁽¹⁵⁾を用いて測定した。図において、a, b は測定しようとする雪を入れるバケツトで、軽金属の円筒である。円筒は二重になつていて、その間に濕つた雪をかたくつめ、更に、外側の円筒には、間隙をつけてセルロイドカバーを張り空気からの熱傳達をしや断し、バケツトの内部の温度を常に零度に保つ。バケツトの内部には測定せんとする雪の試料を入れたガラス管 p を入れる。p の先端は目盛をつけた細い管になつている。p に一定量の濕つた雪を入れ、G を廻わすとバケツトは水平になつて廻転する。p のなかの雪は、温度が零度に保たれたまゝとけないから、水だけが遠心力により分離されて先端の細い管のなかに溜る。一定時間廻転したのち、p を取出して先端の細い管の中に溜つた水の分量をよむ。この水の量を、もとの雪の目方で割つた値の百分率が含水率である。G の廻転は手働で行い、約30秒間に50廻転させた。バケツトは、ウォームギヤで G の廻転の8倍になるから、p に入れた雪に働く加速度は、大体 10^5cm/sec^2 となる。

第21図は、このようにして求めた $\Delta e'$ と含水率との関係を示す。測点は、○印が新雪、●印がざらめ雪である。雪の濕り工合は、雪を温い部屋に放置したり、吹霧器で水をかけたりして、人為的にいろいろに変えた。測定用蓄電器に雪をつめるときは、蓄電器全体がなるべく均一なつまりかたをするように、また一定密度になるようにつめた。しかし、実際には、雪質や含水量によつて、つまりかたがちがうので、一定密度にそろえることがむづかしい。第22図は、同じ含水率の雪について、つめかた、すなわち密度をいろいろに変えて測定したときの、密度と $\Delta e'$ との関係である。横軸は、蓄電器につめた雪の目方を蓄電器の内容積で割つた値で、平均密度を示す。何れも、密度が増すと $\Delta e'$ も増えるが、その増え方は、夫々の曲線の傾斜から平均して、ざらめ雪では密度が 0.1 ふえる毎に $\Delta e'$ は 0.47 、新雪では、密度 0.1 の増加に対し 0.36 の程度である。第21図の測定値は、この値をつかつて、各々の実測値を、雪の平均密度が 0.5 になるようにつめたときの $\Delta e'$ の値に換算したものである。測点はかなりばらついているが、大体実線のまわりに分布しており、 $\Delta e'$ と含水率との関係は充分規則

的であるといえる。しかし、含水率0に対して、 $\Delta\epsilon'$ が0になつていない。これは、上の遠心分離法による含水率測定に本質的な缺陷があるからである。



第 22 図 $\Delta\epsilon'$ と積雪の密度との関係

この含水率は手働式の遠心分離器によつて測定したが、このような機械的分離法では、氷粒の表面に附着している水分を完全に分離することは困難である。それ故、 p の先端の毛細管に溜る水の量が一定になつて、もはやそれ以上廻転をつゞけても増えないという状態に達しても、なお、いくらかの水分は氷粒の表面に保持されてゐるであろう。従つて、この方法では、含水率は実際の値よりもある一定値だけ小さく現われる。また、含水率がこの一定値より小さいと分離すること

ができません、つねに0の値をあたえる。実際に、第21図において、 $\Delta\epsilon'$ が1.0以下の測点で含水率がみかけ上0となつてゐるのはこのためである。このように、ある量の水分が分離されず積雪粒子のなかに残留することは、次のようにしてたしかめた。

含水率の同じざらめ雪を用い、一方ではうえの手働式遠心分離器で水分を分離し、他方では、おなじ雪を高速度の電動式遠心分離器で分離してみた。電動式分離器も、廻転バケツトは内側に雪をつめて、外からの熱の浸入をしや断し、且つ、室温が零度の冷蔵庫で実験した。廻転数は4000r.p.mで、雪に働く加速度はほぼ 10^6cm/sec^2 となり、手働式に比べると約10倍大きい。分離された水の量を比べてみると、常に電動式の方が手働式に比べて多く、含水率になおすと5~6%になることがわかつた。電動式分離器でも、なお若干の水分は完全にとれないで雪のなかに残るであろうが、それは極めて少ないものと考えられる。しかも、この5~6%という値は、第21図において各測点を結ぶ直線を延長した値OPにほぼ等しい。したがつて、手働式分離器では含水率5~6%程度の水が除去されずに雪のなかに残るものと考えてよいであろう。それ故、第21図における $\Delta\epsilon'$ と含水率との関係は、原点をOからPに移すことによつて正しくあらわされることになる。

以上のようにして、濕つた雪の $\Delta\epsilon'$ を測れば、含水率が求められるわけである。しかし、野外の積雪について含水率を求めようとする実際問題にあつては、うえの実験のように、いちいち低温室で雪を凍らせて $\Delta\epsilon'$ を求めるわけにはゆかない。しかし、 $\Delta\epsilon' = \epsilon'_w - \epsilon'_d$ で、 ϵ'_w は直接測定されるから、 ϵ'_d を他の方法で求めておけばよいわけで、それには、7節の第10図(B)において求められた乾いた雪の誘電率と密度との関係がつかわれる。すなわち第10図(B)は、0度以下で乾いた雪の ϵ_w 、すなわち、 ϵ'_d と p との関係を示す。 p は雪の密度

を氷の密度 0.92 で割つたものである。 ϵ_{∞} は一つの p に対してある巾をもっているが、その巾は 0.2 以下である。それに比べて、 $4\epsilon'$ は 0.5 以上 3 までの範囲にあるから、第10図(B)の巾の中央の点を ϵ'_D とすることにすれば、 ϵ'_D の誤差は 0.1 をこえることがなく、 $4\epsilon'$ においておこる誤差は、最悪の場合でも 20% にすぎない。したがつて、含水率の関係誤差も 20% 以下におさえられるわけで、含水率の測定としては、この程度で充分であろうと思われる。

第 III 章 積雪の誘電損失

いままでは、主として、 ϵ_0 と積雪の構造及び含水率との関係を論じ、 ϵ_0 によつて積雪の性質を規定しようとする実用的な問題を主に取扱つてきた。しかし、積雪の誘電的性質については、それ自身としてなお説明を要することがらがある。たとえば、積雪の緩和時間が氷自身の緩和時間に比べて短かいということもその一つである。以下においては、この種のことについて論ずる。

個々の問題にはいるまえに、実験の方法についてひとつの考慮すべき問題がある。実際の雪の性質の時間的変化は、主として氷の粒と粒とのあいだに氷橋が発達することによつておこる。しかし測定は、雪を蓄電器につめて行つたので、このとき氷橋は氷の粒同志のあいだだけでなく、雪と蓄電器の極板とのあいだにもできる。それゆえ、誘電的性質に時間的変化が認められるとしても、それは、雪自体のなかの変化によるものではなく、雪と極板との間の状態変化によるものかもしれない。この点を明かにするため、おなじ雪を、一方は極板に油をぬり、一方は油をぬらないで蓄電器につめ、時間的変化をしらべた。極板に油をぬると極板と雪とのあいだの氷橋の形成は阻止される筈である。この両方の場合で、時間的変化自身は大きく現われたにもかかわらず、お互の差異は極めて少なかつた。したがつて、雪と極板とのあいだにできる氷橋の影響は、あるとしてもそう多くはないであろう。誘電率自体、すなわち複素誘電率の実数部 ϵ' に対しては、氷粒と板との間に氷橋ができることは、大して問題にならないが、複素誘電率の虚数部 ϵ'' には大きな影響を與える可能性も考えられる。しかし、何れにしても、粒と極板との間にできる氷橋よりも、粒と粒との間にできる氷橋の方が大きな影響をもつことは、まずまちがいないことと思われる。

13. 積雪の緩和時間

積雪の ϵ''_{\max} の値は、時間の経過と共に大きくなり、同時に ϵ''_{\max} をあたえる周波数 ω_{\max} は、はじめ氷の ω_{\max} より大きい値を示しているが、やはり時間がたつと共に、しだいに低周波側にずれてゆく。(第14図参照) 緩和時間でいえば、積雪の τ は時間の経過と共にだんだん長くなつて、氷固有の τ に接近してゆく。 τ は、誘電余効の継続時間の目安をあたえる量である。そして、積雪が誘電余効を示すのは、そのなかの誘電体である氷自身が誘電余効をもつからであると、まず考えられるであろう。空気には誘電余効がない。それ故、積雪のな

かの氷がどんな形をしていても、積雪の誘電余効の継続時間は水のそれと一致しなければならない。したがって、積雪の τ は水の τ と同じ値を示す筈である。しかるに、温度を一定にして、氷の τ に変化がおこらないようにして行つた 8 節 第11図の実験では、時間がたつて積雪のなかの氷粒の形と連結状態が変ると、積雪の τ は著しく変化したのである。このことからを説明するためには、積雪のなかにおこつている誘電余効の機構に立入つて考えなければならぬであろう。

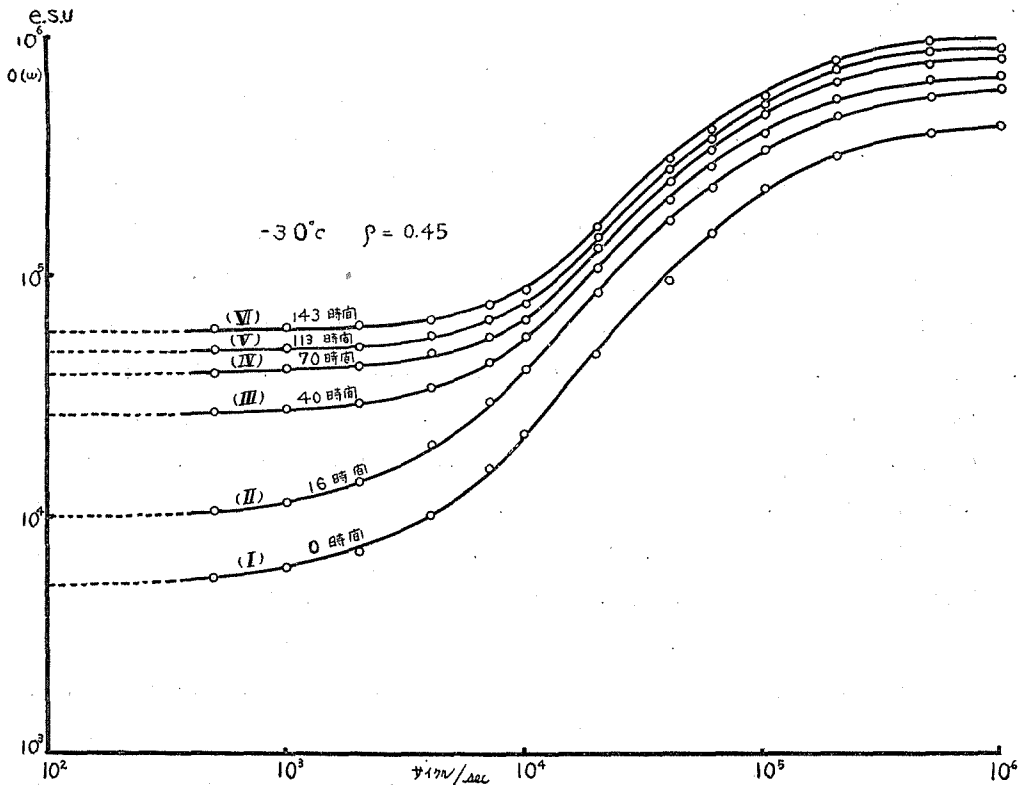
一般に誘電体の余効現象は、大体次の二つの型によつて説明されている。一つは誘電体を構成する分子自身が固有の誘電余効をもつ場合で、これを代表するものがいわゆる Debye の極性誘電体に関する理論である。これについては、既に 3 節においてのべた。いま一つは、誘電体が混合体であるために現われるもので、電気伝導度をもつ二種類、又はそれ以上の誘電体がまざつているためにおこる余効現象である。これが Maxwell-Wagner の理論である。Maxwell は、ある誘電体が、電気伝導度をもつ二種類の誘電体の混合体であるときは、各々の誘電体自身は誘電余効がなくても、混合体としては誘電余効をあらわすと考えた。一方だけが電気伝導度をもつていてもよい。Maxwell は、この二種類の誘電体が電場に直角に、層状をなして重なつている模型をとつたが、Wagner は第 1 の誘電体が他の誘電体中に球状をなして分散している場合を考えた。更に、Sillars は球を廻転楕円体に拡張して計算した。第16図に示した $u_0=0$, $u_0=2$, $u_0=\infty$ なる三つの模型は、誘電余効の立場からみれば、 $u_0=0$ の場合は Maxwell 型の余効を、 $u_0=2$ なる場合は wagner 型の余効をあらわす。 $u_0=\infty$ の場合には、誘電余効は現われぬ。もしひとつの誘電体がそれ固有の誘電余効をもつていれば、それがそのまま現われる。 $u_0=\infty$ の場合、例えば一方が氷であるときは、氷固有の余効をあらわすことになる。

次に、空気と氷の場合について、氷が電気伝導度をもつものとして Maxwell の理論 (Wagner の理論も本質的には同じ) の要点を考えれば次の通りである。ある時刻において、急に一定な電場をかけ始めたとする、氷はまずその ϵ_∞ によつてあたえられる偏極をおこす。しかし、氷は電気伝導度をもつているから、氷のなかに電流がおこつて電荷が移動し、氷の内部電場を弱める。そのため氷の電気変位は減少し、かくて最後には、氷は等電位になり、氷が導体であつたときと同じ状態に落付つく。電場をかけた瞬間にできた状態はある時間のうちにこの最終状態になるわけで、これが Maxwell 型の誘電余効である。したがって、氷の電気伝導度が十分に大きければ、混合体としての積雪の緩和時間が、氷の緩和時間より短いことがありうることになる。

いま、誘電率及び電気伝導度が ϵ_1 , ϵ_2 , 及び σ_1 , σ_2 なる 2 種類の誘電体の層が電場に直角にならんでいるとき、緩和時間 τ は Maxwell によれば、

$$\tau = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{4\pi(\sigma_1 + \sigma_2)}$$

で與えられる。この式によつて積雪の場合を考えてみる。空気を誘電体2とすれば、 $\epsilon_2=1$ 、 $\sigma_2=0$ である。それ故、積雪を構成している氷の ϵ_1 、 σ_1 がわかれば τ は求められる。 $\epsilon_1=\epsilon_{\infty}=3.4$ であつて、この値は多少の不純物を含んでいてもあまり変らない。(第3図参照)氷の σ_1 の値は次のようにして定めた。第23図は、第11図に示した積雪の実効電気伝導度 $\sigma(\omega)$ 対周波数の時間的变化を示す。曲線(I)は充填直後の値、(II)、(III)、(IV)、(V)、(VI)は温度を一定に保つて、夫々16時間、40時間、70時間、113時間、143時間経過したときの値であつて、時間の経過とともに $\sigma(\omega)$ はどんどん増えてゆく。曲線(I)をそのまま $\omega \rightarrow 0$ の方へ延長して、 $\omega=0$ における値を積雪の直流電気伝導度とすると $5 \cdot 10^8$ e.s.uを得る。しかし、これは空気を含めた雪の電気伝導度であつて、雪を構成している氷自身の電気伝導度 σ_1 では



第 23 圖 積雪の実効電気伝導度の時間的变化

ない。必要なのは氷自身の電気伝導度であるが、それは、直接求めることはむづかしいので、この値をもととして次のようにしてきめた。積雪の電気伝導の機構は、氷の粒子から粒子へと氷橋を介して熱が伝わつてゆく熱伝導の機構と類似している。それ故、氷の熱伝導率 μ_1 が積雪の熱伝導率 μ_s の何倍になるかわかれば、同じ倍率を積雪の電気伝導度にかけた値を、その積雪を構成している氷の電気伝導度とみなしても大したあやまりはないであろう。電気伝導度についていえば、氷の値と空気の値との比は無限大で、熱伝導度についてい

えば、その比は約 100 である。したがつて、積雪の値から氷の値を求める倍率は、兩者において全く同じとはいえないが、電氣の流れも熱の流れも氷の実質部分にのみあつて、空気の部分⁽¹⁶⁾は傳わらない点を考えれば大きな差はないにちがいない。吉田の積雪の熱傳導率測定の結果によると、 μ_s は大体 $(1\sim 7)\times 10^{-4}\text{Cal/cm. sec. C}^\circ$ の程度である。しかるに μ_i は $5\cdot 10^{-3}\text{Cal/cm. sec C}^\circ$ であるから、氷の μ_i は積雪の μ_s の 7~50 倍になる。このように、積雪の μ_s はかなり廣い範囲の値をとり、一義的にはきまらないが、これはもちろん、 μ_s は積雪粒子のつながり方によつて著しく変るからである。同じ密度の積雪でも、氷橋が充分成長していない雪の μ_s は小さい。従つて、この場合 μ_i/μ_s をどの位にとればよいかゞ問題となるが、かりにこの比を 30 とすれば、氷の電氣傳導度は $30\times 5\times 10^3$ e.s.u となる。従つて Maxwell 型の誘電余効の緩和時間は、

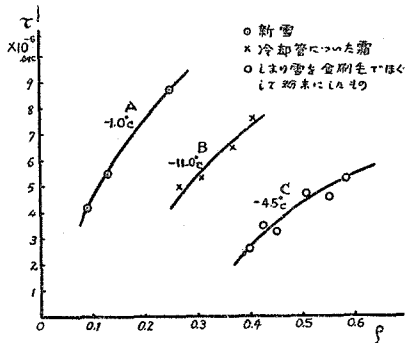
$$\tau = \frac{3.4+1}{4\pi \cdot 30 \cdot 5 \cdot 10^3} = 2.34 \cdot 10^{-6}\text{sec}$$

となる。これは、氷固有の緩和時間 $2.88 \cdot 10^{-5}\text{sec}$ に比べると約 1 桁短かい。これらの緩和時間に相当する ω_{\max} の値はそれぞれ 68kc、及び 5.6kc である。したがつて、積雪の ω_{\max} は 5.6 kc と 68kc との中間の周波数においてあらわれるはずで、実際に、これまでに測定してきた積雪の例では、 ϵ''_{\max} の位置は、常に 30~50kc 附近に観測されているのである。

積雪が第 16 図に示したごとく、氷粒の一部は $u_0 = \infty$ 、残りは $u_0 = 0$ の構造をもっているものとすれば、積雪の誘電余効は、氷固有の誘電余効と Maxwell 型の誘電余効とがある割合で同時にあらわれることになる。したがつて、何れの余効が主に現象を支配しているかによつて積雪の誘電余効はきまる。蓄電器に、粉末状の新しい雪をつめた直後の R'_0 では、氷固有の余効を示す部分の割合は、Maxwell 型の余効を示す部分に比べてずつと少ない。それ故、全体として観測される積雪の τ は、氷固有の τ よりも短かい。しかし、時間がたつて氷橋が成長して、 $u_0 = \infty$ の状態の割合が増すにつれ、積雪の τ はだんだんと長くなつて、積雪を構成している氷固有の τ に近づいてゆくと考えてよいであろう。

上に用いた氷の電氣傳導度 σ_1 は、現実に積雪を構成している氷自身のものであつて、この氷は不純物を含んでいる。氷は、半導体とみなしうと思われるが、半導体においては、不純物によつて電氣傳導度がふえる。実際に、上記の σ_1 は、純粹な氷のそれとして與えられている 4.68×10^2 e.s.u よりも大きい、この大きい値は積雪の含んでいる不純物によるものとして説明される。そして、 σ_1 が大きいために τ が小さくなつたのである。不純物の少ない低温室でつくつた人工雪（完全に純粹であるとはいえないが）についての測定例、第 6 図、または、第 1 表に明らかなごとく、 τ/τ_1 は天然の不純物を含む雪に比べて大きいことがわかる。

以上のごとく、積雪の緩和機構は非常に複雑であつて、緩和時間 τ も、單に温度や密度を與えただけで一義的にはきまらない。緩和時間にもつとも大きな影響をあたえるのは、実に粒



第 24 圖 緩和時間と密度との関係

子と粒子とのあいだの結合状態であるといえる。第 24 図は、これまでに得た積雪の測定例のうちから、いろいろな種類の雪について、温度を一定に保ち、密度をかえたときの緩和時間の変化を示す。A は新雪、B は低温室の冷却管に凝結している霜、C はしまり雪を金刷毛で掻きおとし、氷粒をばらばらにして粉末状にしたものである。三つの場合とも、共通な傾向は、密度が大きくなるとともに緩和時間が長くなつてゆくことである。これは、密度が大きくなれば

密度が小さい場合に比べて氷粒同志がくつつきあう割合が増えるからである。しかして、A と B とを比べると、A の雪の温度は -1.0°C であるが、B に示した雪は、 -11.0°C であつて、はるかに低く。ところで、氷固有の τ は、温度が低くなるほど長くなるべき筈であるのに、温度の高い A よりも全体として B が短かいのは、一見不合理のようである。しかしながら、温度の低い雪ほど、さらさらとしていて氷粒同志はくつつきにくいことは日常経験するところである。それ故、温度の低い B の雪では、温度の高い A の雪に比べて、氷固有の τ は長くなつていながらもかゝらず、氷粒同志のくつつきかたが小さいために、氷固有の余効の現れかたが弱い、積雪としての τ は短かくなるとして説明されるであろう。全く同様にして、C の雪が比較的密度が大きいかゝらず、緩和時間が A、B に比べて更に短かいのは、金刷毛でわざわざ氷粒一つぶ一つぶの結合を断ちきつているからである。

以上では、積雪の電気伝導を、積雪を構成している氷の粒が、一樣な体積伝導度をもつとして取扱つた。しかし実際には、積雪に含まれている不純物は、主に氷粒の表面に存在していて、積雪の電導性は粒子の表面伝導によるとも考えらる。また、事実このように考えた方が適当であると思われる現象が観測された。これについては次節でのべることにする。

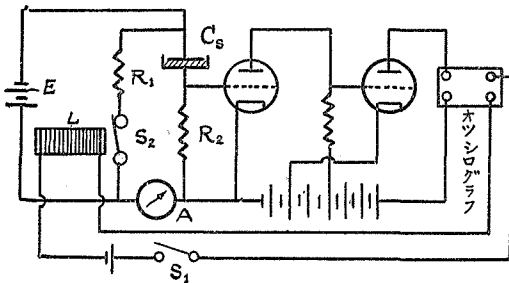
14. 積雪の誘電異常現象

第 II 章にあげたいくつかの例にみられる通り、積雪は低周波域で大きな誘電体損失を表し Cole-Cole 図形は正常な円弧にはならず大きな異常を示した。そして、これが積雪のなかに含まれている不純物によることも、第 II 章で明にした。前節で取扱つた緩和時間も不純物の影響として説明されたが、それは比較的高周波域に関するものであつた。この節では、低周波域における不純物の影響について考える。

誘電体の損失をおこす原因としては、誘電体が電気伝導度をもつためにおこるジュール損失と、誘電余効による純誘電的損失とが考えられる。積雪の低周波域における損失は、氷の純誘電的損失によつて説明するにはあまりに大きすぎるのであつて、伝導損失によるものも考えなければならぬ。それで、積雪についての誘電異常現象をしらべた。

(i) 吸収電流

いつぱんに、誘電余効のある誘電体をもつ蓄電器を、電池で充電すると、最初瞬間的に大きな電流がながれ、それに引つゞいて指数函数的に漸減する電流が流れ、十分に時間がたつと、定常電流が流れるようになる。(直流電気伝導度が零の誘電体の場合は、この定常電流は零である) また、逆に充電した蓄電器を短絡すると、瞬間的に流れる放電電流に引続き、やはり時間と共に減衰してゆく電流が観測される。これらの電流のうち、時間と共に減衰してゆく電流部分を吸収電流といふ、このような現象を誘電異常現象という。これを測定すれば、誘電余効の Decay function が求められる。



第 25 圖 吸収電流測定回路

第25図に積雪の吸収電流の測定に用いた回路を示す。Csは積雪をつめた蓄電器であつて、最初低抵抗R1でその端子を短絡しておく。スイッチS1を閉じて、電磁石Lを働かせると、S2が開いて電池Eの電圧は、Csの両端にかゝり、充電が開始される。充電電流はCsに直列に入れた抵抗R2を通じて流れるから、R2の両端には、吸収電流の変化に比例した電圧降下があらわれる。この電圧降下を、真空管増巾器で増巾し同期装置により、充電開始と同時に電磁オツシログラフに記録させた。Csは直流抵抗R2を通じて充電されるから、この回路自身はCsの誘電余効の外にCs・R2に相当する回路の緩和時間をもつ。しかしながら、R2はCsの漏洩抵抗に比べて充分小さいのでCs・R2は大体 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ secの程度であり、オツシログラフの振動子の周期(10^{-3} sec)に比べて十分小さい。したがつてこの装置による吸収電流の観測範囲は、振動子の周期によつてきまり、 10^{-3} sec以下の変化は観測することができない。しかし、目的が低周波域における誘電異常の研究であるから、この程度でも差支えないであろう。実験は 10^{-3} sec $\sim 10^{-1}$ secの範囲をオツシログラフで測定し、あとひきつづき鋭感電流計で充電開始から5分後までの電流変化を観測した。

第26図及び第27図に測定結果を示す。横軸に時間を、縦軸にオツシログラフのふれ($\times 10^{-6}$ amp)を示してある。第26図A, B, Cは、密度0.41のかたしまり雪を温度 -12.0°C にたもつて充電電圧を143V, 290V, 405Vとしたときの吸収電流の変化を示す。A, B, Cの各々は逐次残差法により、次の実験式であらわすことができる。

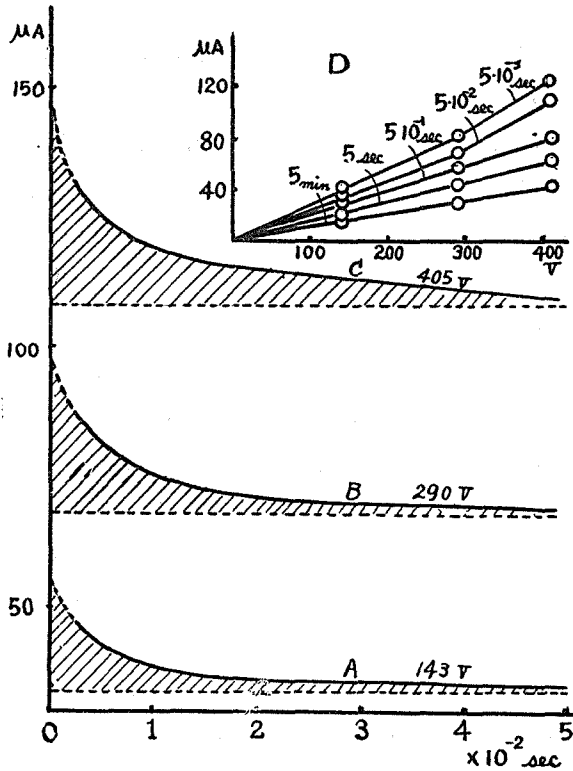
$$A: I_n(t) = (34 + 6.70e^{-72.4t} + 7.76e^{-205t} + 9.11e^{-511t})$$

$$B: I_n(t) = (67.5 + 10.71e^{-43.3t} + 17.1e^{-372t})$$

$$C: I_n(t) = (107.5 + 16.8e^{-42.5t} + 15.8e^{-555t})$$

単位: $\times 10^{-6}$ amp, $t = \text{sec}$.

すなわち、定常電流をあらわす第1項に、緩和時間として $1/50\text{sec} \sim 1/500\text{sec}$ 程度の値をもつ、二つ又は三つの吸収電流が重なつたものとして、形式的にあらわすことができたわけ

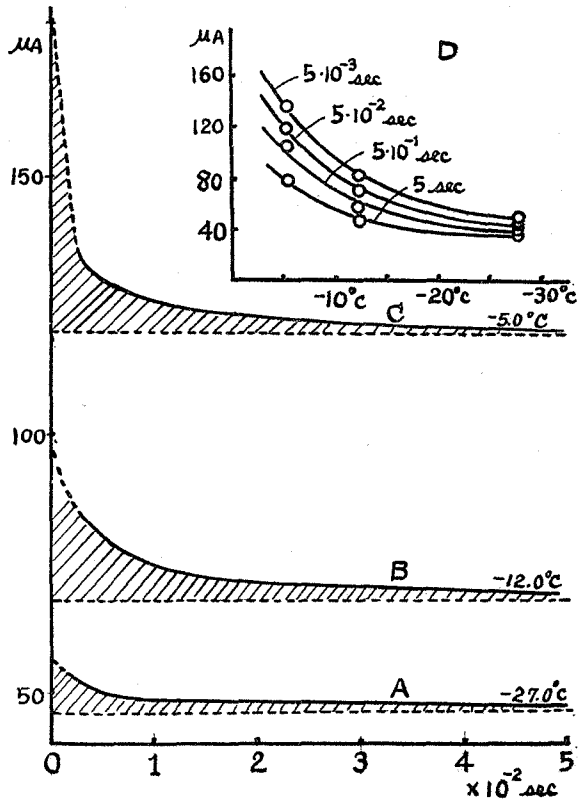


第26圖 積雪の吸収電流と充電
 々圧 温度一定 -12.0°C
 かたしまり雪

第27図は、同じ雪について、充電々圧を 290V に一定に保ち、雪の温度を -5.0°C , -12.0°C , -27.0°C と変えたときの吸収電流の変化を示す。温度が高いと、吸収電流は大きくあらわれているが、温度が低くなれば著しく小さくなる。この様子を、26図と同じく、 $5 \cdot 10^{-3}$ 秒、 $5 \cdot 10^{-2}$ 秒、 $5 \cdot 10^{-1}$ 秒、5秒における電流値と温度との関係として図示すると、第27図Dのごとくなる。

以上のことから、積雪には、数百分の一秒から数分にわたるいろいろな緩和時間をもつ吸収電流が含まれていることがわかる。そして、これが低周波域における大きな損失の原

である。しかし、実際には、第1項の定常電流のようにみえる電流も、実は、非常にゆつくり減衰するのであつて、それを示すために、D図をかいた。D図は、 $5 \cdot 10^{-3}$ 秒、 $5 \cdot 10^{-2}$ 秒、 $5 \cdot 10^{-1}$ 秒、5秒及び5分後の電流値を、充電々圧を横軸にとつてプロットしたものであるが、これでわかるように、たとえば充電々圧が 405V のとき、 $5 \cdot 10^{-3}$ 秒で $108 \cdot 10^{-6}\text{amp}$ であつたものが、5分後には $40 \cdot 10^{-6}\text{amp}$ に減衰している。測定は充電開始後5分で打切つたが、電流はなおも減りつづけていた。



第27圖 積雪の吸収電流と温度変化 充電々圧一定 290V

因となるものと考えられるが、このように長い緩和時間の吸収電流は、積雪中の不純物のイオンの移動によつておこるものとするのが、もつとも適切な考えであろう。

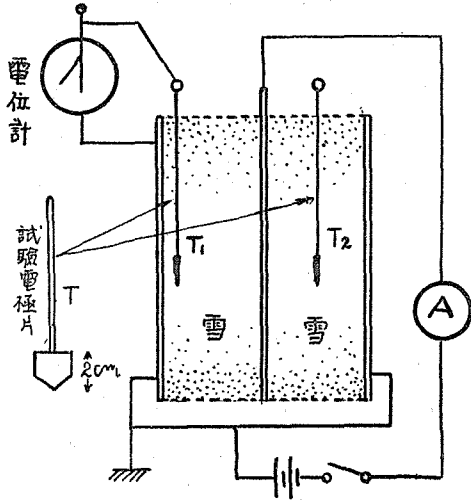
しかし、こゝで、たゞ大きい値の緩和時間の説明をするだけでは不十分で、上のように広い範囲にわたるいろいろな緩和時間をもつ吸収が同時にあらわれることに対しても、説明をあたえる必要がある。これについては、次のような Murphy-Lowly⁽¹⁷⁾の考えがある。

固体誘電体が不純物によるイオンを含んでいるとしても、イオンが固体内部に溶けこんだ形で一緒に含まれているとすると、液体の場合のように自由に動きうるとは考えにくい。Murphy-Lowly は、固体誘電体の電導性は、物質にわたつて一緒にあらわれるものでなくて、固体内部のある路筋に沿つてイオンが集約的に分布して電導路を形成し、その路に沿つて電気が流れるものと考えた。彼は、このような電導路は、主に固体内部の顕微鏡的な割目や、又は結晶缺陷の表面であろうと想像した。表面は湿氣を吸着して常に極めてうすい水の膜でつまれており、イオンはこのなかを移動する。あるいは、表面に水の膜はなくても、表面では物質の密度が小さいので、イオンが動きやすいとも考えられる。そして、実際に固体絶縁物に割目やひびわれができると絶縁抵抗が急に低下することは、しばしば経験することである。イオンは、このうすい膜の部分に正負入り交つて吸着されているが、その吸着されている強さは一様でなく、膜の内側、すなわち実質部分の表面に近いものほど強く、膜の表面に近づくほど弱い。電場がかゝると、イオンは移動するが、膜の内部を移動する速さは、吸着力による束縛のため、膜の内側、実質部分の表面に近接しているイオンはゆつくり動くが、膜の表面のイオンはほとんど自由イオンとして速に動く。それ故、イオンは膜のなかでの位置により、その位置に応じた吸着力をうけて、いろいろな値の移動速度をもつことになる。このため外部回路に対しいろいろな値の緩和時間をもつた吸収電流が同時にあらわれるのである。

従つて、積雪の電気伝導度もこのような膜のなかを動くイオンによつてきまると考えることができる。それ故、温度が高くなつて吸着力が減ると、膜のなかを自由に動くイオンの数が増え、電気伝導度及び吸収電流が増す。また時がたつて氷粒と氷粒とが氷橋でつながるようになると電導路は短くなり、電気伝導度は時間の経過と共に増す。そして、うえにのべたごとく、積雪の吸収電流が、充電開始後容易に一定にならず、数分以上にわたつて減りつゞけてゆくのは、イオンが電導路を通つて長い距離を動いてきて、極板附近に蓄積し、これが空間電荷となつて、電場とは逆向きの起電力を生じてゆくからであると考えることができる。

(ii) 積雪内部の電位分布

うえに観測された吸収電流が、イオンの移動によつておこるものとする、雪に直流電圧をかけると、正負のイオンは、それぞれ反対符号の電極に向つて、移動して、極板附近に蓄積し、空間電荷を形成してゆく。したがつて雪のなかの電位分布が時間の経過と共に変化

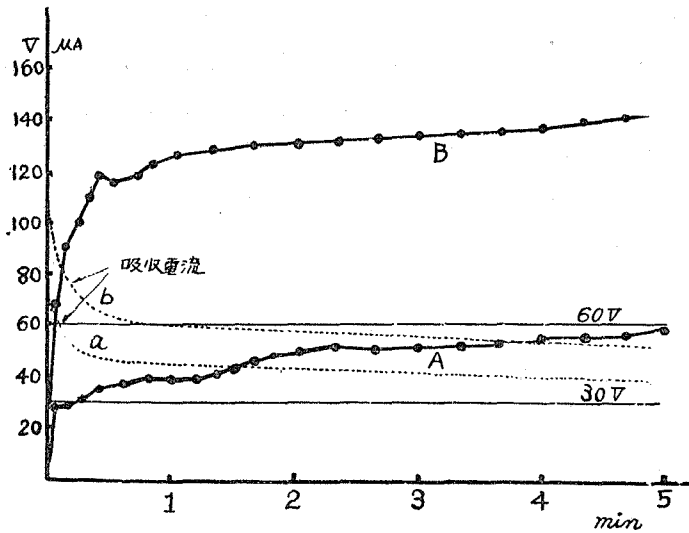


第28圖 積雪内部の電位変化測定装置

してゆく筈である。これを調べるために、第28図の装置により実験を行つた。Tはうすい眞鍮板の小さい試験電極である。図のごとく中央電極と外側の二板の電極との間に電圧をかけて、同じ構造の二つの蓄電器とし1本の試験電極 T_1 は、一方の蓄電器の電極より $1/5$ の位置に差込み、他の1本の T_2 は他方の蓄電器の中央に差込む。そして、試験電極の電位の時間的变化を電位計で観測した。

第29図、A、Bは充電電圧が150V、300Vのときの試験電極 T_1 の接地電極に対する電位を示す。そして、a及びbは同時に測つた夫々の電圧に対応する吸収電流の変化である。

る。極板間の中央においた試験電極 T_2 は75V、及び150Vの電位を示し、時間がたつても変化を示さない。空間電荷がなくて、電位傾度が一様であるとすれば、曲線A、Bはそれぞれ、充電電圧150V、300Vの $1/5$ の30V、60Vを示して一定にとどまらなくてはならない。はじめ、両曲線とも、この値をとつているが、時間がたつとともにこの値を



第29圖 積雪内部の電位変化

こえ、5分ののちには、その倍以上の値になつている。これは、明かに、電極附近に空間電荷が現われたことを示すものであつて、しかもその変化が緩慢であることは、イオンの移動によるとして説明することが妥当である。

補 遺

積雪の密度と形数

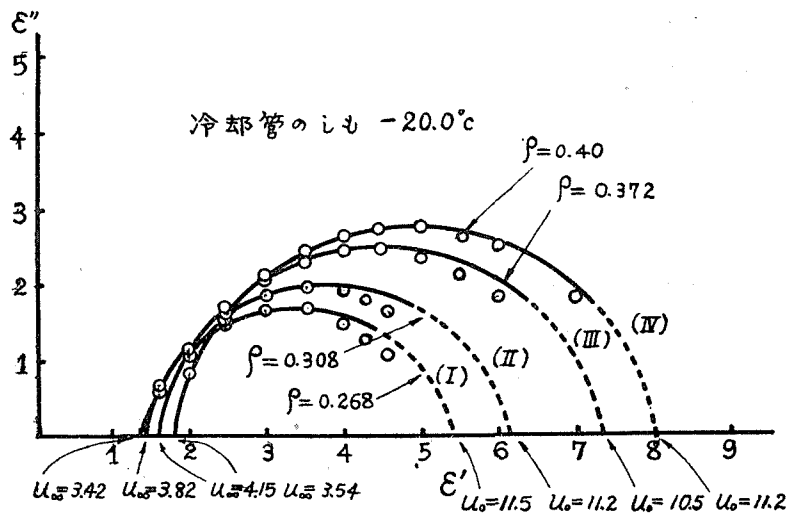
7節の第10図において、積雪の静電誘電率及び光学誘電率に関する形数 u_0 、 u_∞ は、それぞ

れ10~25, 及び 2.5~10 の範囲にあることを知つた。これらは積雪の代表的な種類である新雪, しまり雪, ざらめ雪について測定したものであるが, 測定時の温度や密度などの条件がいろいろであるために, 測点ば入り交つて居り, これから積雪の形数が雪質によつて, また密度によつてどのように変るかを判定することはむづかしい。また, 8節, 9節においてのべたごとく, 積雪の形数は氷粒同志の連結, すなわち, 氷橋の或長により時間の経過とともに変る。

もともと Wiener は, 混合誘電体において, 分散誘電体粒子の形数 u は, 分散粒子の密度 ρ (又は分散粒子の占める容積の全容積に対する割合 p) があまり大きくなって, 粒子同志が独立に分散しているときは, u は, 近似的に粒子の形だけできまり, ρ 又は p によつてあまり変化はないと考えた。しかし, W. John⁽¹⁾ は, 空気蓄電器の極板間に, 半球状 (または立方状) の金属または絶縁物の物体を適当に配置して, 密度と形数の変化を調べたところ, 形は一定でも密度を増せば形数はある程度増えることを示した。

しかし, 積雪のように, 粒子同志がつながっている場合には, 形数 u は連結状態によつて大きく変ることは, うえにのべたとおりである。したがつて, 同じ雪質の雪でも, 個々の粒子の形は変化しなくても, 圧縮して密度を増せば, 氷粒同志の連結の度合がかわり, u は変化するであろう。また, もし, 密度を増しても, 氷粒同志がくつきにくければ, 形数 u はあまり変化しないであろう。

1例として, 先にかゝげた第4図, (B)において, 曲線 (I), (II), (III) は, 温度が -1.0°C の少し湿つた新雪を, それぞれ 密度が 0,095, 0,132, 0,254 となるように圧縮して変えたときの複素誘電率の変化を示す。それぞれの円弧が ϵ' 軸を切る点より ϵ_0 , ϵ_{∞} を求め,



第 30 圖

(1) Wilhelm John: 1918. Untersuchungen über die Dielektrizitätskonstante von Mischungen fester Körper mit Luft.

Ann. d. physik 55 229.

形数 u_0 , u_∞ を計算してみると、次のようになる。

密度	u_0	u_∞
0,095	23.6	2.31
0,132	32.4	4.10
0,254	37.3	4.10

すなわち、このように湿つた雪では、圧縮して密度を増すと、形数は増えてゆく。

つぎに、第30図において、曲線 (I), (II), (III), (IV) は、 -20°C に冷却された雪（低温室の冷却管に昇華しているしも）について、同じく密度を 0,268, 0,308, 0,372, 0,4 と変えて測定したときの複素誘電率の変化を示す。これから密度による形数の変化を求めると、

密度	u_0	u_∞
0,268	11.5	3.42
0,308	11.2	3.82
0,372	10.5	4.13
0,41	11.2	3.54

となつて、圧縮して密度を増しても形数にはほとんど変化はない。

うえの結果は、前者の雪は温度が高くて湿つていたために、圧縮によつて氷粒同志がくつきあい、形数は増えたのであるが、後者の雪では温度が低く、乾いてさらさらしていたために、少々圧縮した程度では氷粒同志はくつきあはなかつたとして説明できる。

以上のことから、積雪の形数は、積雪粒子の形だけによつて定められるのではなくて、むしろ粒子相互の連結状態によつてきまると考えてよいであろう。したがつて形数を積雪の状態をあらわす一つの量として使う場合には、 u は粒子の形をあらわすのではなくて、粒子の連結状態、すなわち氷橋の割合をあらわすものと解釈すべきであろう。

要 約

この論文は、積雪を蓄電器の極板間にはさみ、通常の方法で、周波数が $0.5\text{kc} \sim 1000\text{kc}$ の範囲にわたり、その誘電的性質を観測したものである。以上の結果を要約すると次のようになる。

純粹で均質な氷の誘電率は、うえの周波数範囲で、静電誘電率 $\epsilon_0=80$ という大きな値から、光学誘電率 $\epsilon_\infty=3.4$ という値まで異常分散することはよく知られている。測定結果によれば、積雪の誘電率も同じ周波数の範囲で異常分散することがわかつたが、特に次のような誘電的性質を示すことが観測された。

- (1) 積雪の誘電率の分散域は、つねに、同温度の氷の分散域よりも高い周波数範囲にあらわれる。
- (2) 積雪の誘電率は、積雪のなかで、氷の部分が占めている容積の割合 p (積雪の密度を

氷の密度で割つたもの) だけでは一義的にきまらない。

- (3) 積雪の誘電的性質は、時間の経過と共に変化し、 ϵ_0 は時間がたつと共に増え、あたえられた p によつてきまる誘電率の最大値 $\bar{\epsilon} = p\epsilon_i + (1-p)\epsilon_n$ (こゝに ϵ_i, ϵ_n は夫々氷及び空気の誘電率) に近ずいてゆく。また、同時に、積雪の緩和時間はだんだん長くなり、同温度の氷のそれに近ずいてゆく。

これら三つの誘電特性は、積雪の物理的性質が時間と共に変ることによるのであつて、これらは主に、混合誘電体に関する Wiener の式

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + u} = p \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + u} + (1-p) \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2 + u}$$

をもととして説明することができる。この式は、誘電体 1 (誘電率 ϵ_1) が誘電体 2 (誘電率 ϵ_2) のなかに、いろいろな状態で分散しているときの混合誘電体の誘電率 ϵ をあたえるものである。 u は誘電体 1 の形や分布状態できまる常数で、形数とよばれ $0 \leq u \leq \infty$ の間のいろいろな値をとる。たとえば、誘電体 1 が円柱状で電場に平行に並んでいるときは ∞ 、電場に直角にならんでいるときは 0 で、球形であるときは $u=2$ である。 p があたえられているとき $u=\infty$ のとき ϵ は最大、 $u=0$ のとき ϵ は最小になることが Wiener によつて証明されている。

積雪は、氷の粒と空気との混合物であるから、誘電体 2 を空気とすれば $\epsilon_2=1$ となり、第 2 項は消える。この式をつかつて積雪の形数を求めてみる。すなわち、 ϵ_1 に氷の静電誘電率 80 を、 ϵ に実測した積雪の静電誘電率 ϵ_0 を入れると、 ϵ_0 に関する形数 u_0 が求められる。いろいろな雪について測定してみると u_0 は 10 から 25 の範囲にあることがわかる。同様にして光学誘電率 ϵ_∞ に関する形数 u_∞ は 2.5 から 10 の範囲にあることが観測された。このように、積雪の u_0, u_∞ はある巾をもつているため、誘電率は p をあたえただけでは一義的にきまらない。

また、積雪をほぐして蓄電器につめたまゝ、温度を一定に保つて放つておくと、時間がたつにつれ ϵ_0 は大きくなり、 $\bar{\epsilon}_0 = p\epsilon_i + (1-p)\epsilon_n$ に近ずいてゆくことがみられた。この時間的変化は、形数でいえば、 u_0 が時間がたつと共に大きくなり、 ∞ に近ずいてゆくことを意味する。これは、最初、蓄電器に雪をばらばらにほぐしてつめたときは、氷粒同志の結合はあまりつよくなく、 u_0 は小さかつたものが、時の経過と共に、氷の粒と粒とは氷橋でつながり、電場の方向にのびてゆく氷の柱の割合がふえ u_0 が大きくなつたと解釈できる。氷橋は、同時に、電場と直角の方向にものびてゆくが、これはむしろ $u_0=0$ の状態になつてゆくのであり、誘電率の増加にはほとんど寄与しないのである。

また、 ϵ_0 の時間的変化にともなつて積雪の緩和時間がだんだん長くなつて、氷のそれに近ずいてゆく現象も観測されたが、これも氷橋の成長ということで説明される。すなわち、積雪の誘電機構は、氷固有の誘電余効と、雪が氷と空気との不均質な混合体であるために生ずる誘電余効とが、同時に重なつてあらわれる。そして形数 u の大小によつて、その何れの余効が

主に現象を支配しているかゞきまると考えられる。すなわち、 u が小さくて、氷粒同志の結合が弱いあいだは、主として後者の余効が現象を支配しているが、時間がたつて氷橋が成長し、 u が大きくなつてゆくにつれ、次第に氷固有の余効が支配的になつてくるとみられる。しかして、積雪を構成している氷は、一般に不純物を含んでいて、大きな電気傳導度をもつ。そのため、後者の余効が支配的である間は、積雪の緩和時間は氷固有のものよりも短かいが、時がたつて氷粒が氷橋で電場の方向に連絡されてゆくにつれ、次第に氷固有の緩和時間に近ずいてゆくとして説明される。

このような誘電特性の時間的変化は、積雪を油のなかに浸し、氷橋の成長をそ止してやると、うえのような時間的変化はおこらないことによつて確かめられた。同時にこの実験は、積雪粒子の分散媒を、誘電率1の空氣から誘電率2.5の油に置換したことになり、適当な周波数における誘電率をとれば Wiener の比例要請をたしかめることができるわけである。Wiener の比例要請は、混合体の物理的性質を変えないで、各成分の誘電率を n 倍すれば、混合体の誘電率も n 倍になるというのであつたが、この実験により、比例要請の正しさをある程度までたしかめることができた。

積雪の誘電的性質は、雪を蓄電器につめて測定するだけでなく、なるべく戸外につもつた自然のまゝに近い状態にして測定できることが望ましい。それで蓄電器の極板と雪との間に故意に空隙を設け、雪にさわらないようにし、積雪が気温の変動ともない、新雪から、しまり雪、ぬれ雪、ざらめ雪と変化してゆくときの誘電率の変化を測定した。その結果、積雪の誘電率は雪がしまつてゆくにつれ増えてゆくことがみられ、とくに温度が高くなつて水を含んでくると、誘電率は水を含んでいないときに比べてずつと大きくなることがみられた。逆に、このことを利用し、ぬれ雪の誘電率を測つて含水率を求めることができるわけで、実験を行つた結果、最大20%の誤差で含水率を求めうることが確められた。

積雪の誘電損失は、低周波域において異常に大きくなるのが、これまでの交流測定においてみとめられたので、最後に筆者はオツシログラフをつかつて充電法により、積雪の吸収電流を測定してみた。その結果、1/500 秒から 1/50 秒、或いはそれ以上にわたる長い緩和時間をもつ吸収電流が観測されたが、これらはすべて、積雪に含まれているイオンの移動にもとづくものであることが結論された。

この研究は、吉田教授の指導によつて行つた。また実験にいろいろと協力して下さつた応用物理学部門研究員諸氏に対し厚く感謝の意をさしげる。

文 献

- 1) Dewar, J. 1897 Note on the dielectric constant of ice and alcohol at very low temperatures. Proc. R. Soc., 61, 2.
- 2) Wintsch, H. 1932 Ueber Dielektrizitätskonstante, Widerstand und Phasenwinkel des Eises. Helv. Phys. Acta., 5, 126.

- 3) Errera M. J. 1924 La Dispersion des ondes herziennes dans les solides au voisinage du point de fusion J. de physioque, **5**, 304.
- 4) Smyth, C. P. and Hitchcock 1932 Dipole polarization in crystalline solids. J. A. C. S., **54**, 4631.
- 5) Murphy. E. J. 1934 The temperature dependence of relaxation time of porarization in ice. Trans. of Electro-Chem. Soc., **65**, 132.
- 6) Cole, K. S. and Cole, R. H. 1941 Dispersion and absorption in dielectrics. I. Alternating current characteristics. J. Chem. phys., **9**, 340.
- 7) Debye. P. 1929 Polare Molekeln chap. V.
- 8) Wagner. K. W. 1941 Erklärung der dielektrischen Nachwirkungsvorgänge auf Grund Maxwell'scher Vorstellungen. Archiv für Elektrotechnik, Bd. **2**, 371.
- 9) Sillars, R. W. 1937 The properties of a dielectric Containing semi-conducting particles of various shapes. J. I. E. E., **80**, 378.
- 10) Wiener. O. 1910 Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. Mathematisch-Physikalische Klasse Bb. **62**, 256.
- 11) Lord Rayleigh. 1892 On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium. Phil Mag, **34**, 481.
- 12) Saito, R. Physics of fallen Snow 中央气象台 歐文彙報, **19** No.1-2.
- 13) 吉田順五、小島賢治 1950. 雪の変形 I 低温科学, **5**, 75.
- 14) 坂本捷房 1939 間隙変化法による高周波誘電体損失角の測定 電気学会誌, **59** No. 610, 297.
- 15) 古川巖 1950 含水量測定の巻 雪と生活, **6**, 14.
- 16) 吉田順五 1950 積雪塊の熱伝導率の測定 低温科学, **3**, 77.
- 17) Murphy. E. J. and Lowry. H. H. 1930 The complex nature of dielectric absorption and dielectric loss. J. phys. chem., **34**, 598.

R é s u m é

The author made many dielectric measurements on blocks of snow cut out of the snow cover settled on the open field. Real and imaginary parts of the complex dielectric constant both show large dispersions in the range of alternating current frequency from 1 KC to 100 KC. This is expected from the well known fact that ice shows a conspicuous dielectric dispersion in the same range. However, many differences are found between the dielectric properties of snow and those of ice. It is a matter of course that the dielectric constant of snow is smaller than that of ice in the whole range of frequency. The real part ϵ' of the dielectric constant of snow continues to increase as the frequency is lowered to zero while that of ice attains a constant value of about 80 in the low frequency range. The imaginary part ϵ'' of the dielectric constant of snow is also found to have a high value in the low frequency range while ice has zero value in the same range. The author made chemical examinations of thaw water of snow and found varieties of impurities in it. He also made electrostatic examinations of the dielectric after-effect of snow and found that it showed a large after-effect. Therefore the author attributes the dielectric anomalies of snow in the low frequency range to the existence

of impurities in it.

ϵ'' of snow has a maximum value in the medium frequency range like that of ice but the frequency at which the maximum occurs is higher with snow than with ice. This fact means that snow has a relaxation time shorter than that of ice. The author explains this shortness of the relaxation time by the Maxwell-Wagner theory attributing suitable value of electric conductivity to the fact that ice is similar to snow in structure.

Property of snow is usually specified by its temperature and its specific weight. However, it is well known that these two quantities are necessary but not sufficient for the specification of snow property. The author suggests that the dielectric constant is suitable as a third quantity for the specification of snow structure. He calculated by experimental value of the dielectric constant of snow the "form number" (Formzahl) u which Otto Wiener introduced in his theory on the mixture dielectrics. Snows of the same temperature and specific weight but of different structure show different values of u . It is found that u is smaller for granular structure and larger for coherent structure. u shows a very large value when snow is wet so the measurement of the dielectric constant of snow promises to be useful for the determination of the thaw water content of wet snow.